



**TUGAS AKHIR - MO141326**

**ANALISIS PROPAGASI SCOURING DAN FREE SPAN  
PADA PIPA BAWAH LAUT KONDISI IN-TRENCH  
AKIBAT PERGERAKAN GELOMBANG DAN ARUS**

**BAGUS PERKASA**

**NRP. 4312100142**

**Dosen Pembimbing :**

**Suntoyo, S.T., M.Eng., Ph.D.**

**Agro Wisudawan, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN**

**FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN**

**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**

**Surabaya 2017**



**FINAL PROJECT - MO141326**

**ANALYSIS OF SCOURING AND FREE SPAN  
PROPAGATION ON SEABED WITH THE IN-TRENCH  
CONDITION DUE TO WAVE AND CURRENT  
COMBINATION**

**BAGUS PERKASA**

**REG. 4312100142**

**Supervisor :**

**Suntoyo, S.T., M.Eng., Ph.D.**

**Agro Wisudawan, S.T., M.T.**

**OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT**

**FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY**

**SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY**

**Surabaya 2017**

**ANALISIS PROPAGASI SCOURING DAN FREE SPAN PADA PIPA BAWAH LAUT  
KONDISI IN-TRENCH AKIBAT PERGERAKAN GELOMBANG DAN ARUS**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada  
Program Penelitian S-1 Departemen Teknik Kelautan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**BAGUS PERKASA**

**NRP. 43 12 100 142**

Disetujui oleh:

1. Suntoyo, S.T., M.Eng., Ph.D.

(Pembimbing 1)

2. Agro Wisudawan, S.T., M.T.

(Pembimbing 2)

3. Prof. Ir. Mukhtasor, M.Eng., Ph.D.

(Penguji 1)

4. Drs. Mahmud Mustafin, M.Sc., Ph.D

(Penguji 2)

5. Dr. Ir. Wahyudi, M.Sc.

(Penguji 3)

6. Dr. Ir. Hasan Ikhwani, M.Sc.

(Penguji 4)

**SURABAYA, JULI 2017**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**ANALISIS PROPAGASI *SCOURING* DAN FREE SPAN PADA PIPA  
BAWAH LAUT DENGAN KONDISI *IN-TRENCH* AKIBAT  
PERGERAKAN GELOMBANG DAN ARUS**

**Nama** : Bagus Perkasa  
**NRP** : 4312 100 142  
**Departemen** : Teknik Kelautan FTK – ITS  
**Dosen Pembimbing** : Suntoyo, S.T., M.Eng., Ph.D.  
Agro Wisudawan, S.T, M.T.

**ABSTRAK**

Pipa yang diletakkan pada *seabed* akan menyebabkan pola aliran disekitarnya berubah. Berubahnya pola aliran dapat menyebabkan pergeseran sedimen disekitar pipa bawah laut dimana fenomena tersebut dikenal sebagai *scouring*. Proses *scouring* mengakibatkan bagian bawah pipa kehilangan daya dukung tanah dan mempengaruhi stabilitas pipa. *Scouring* yang terjadi pada pipa bawah laut dapat diamati secara dua dimensi maupun tiga dimensi. Proses awal mula *scouring* terjadi pada bagian tengah pipa yang biasanya didekati secara dua dimensi sampai didapatkan kedalaman maupun lebar *scouring* dan kemudian persebaran *scouring* terjadi sepanjang pipa yang nantinya akan membentuk *free span*. Pada tahap dimana *free span* terbentuk akibat *scouring* maka dapat menyebabkan pipa mengalami defleksi ke dalam lubang *scouring* yang dapat memicu kegagalan pipa itu sendiri.

Dalam penelitian tugas akhir ini akan dilihat bagaimana pengaruh gelombang dan arus terhadap *scouring* maupun variasi *embedment e* maupun diameter pipa terhadap propagasi *scouring* hingga terbentuknya *free span*. Parameter yang ingin didapatkan dari penelitian tugas akhir ini adalah kedalaman *scouring*, lebar *scouring*, kecepatan propagasi sepanjang pipa, waktu yang dibutuhkan hingga terbentuknya *free span* dan hubungannya dengan kedalaman *scouring*.

Kata kunci : diameter pipa, pemodelan matematis, pipa bawah laut, profil 2D, *scouring*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **ANALYSIS OF SCOURING AND FREE SPAN PROPAGATION ON SEABED WITH THE IN-TRENCH CONDITION DUE TO WAVE AND CURRENT COMBINATION**

**Name** : Bagus Perkasa  
**Reg. Number** : 4312 100 142  
**Department** : Teknik Kelautan FTK – ITS  
**Supervisors** : Suntoyo, S.T., M.Eng., Ph.D.  
Agro Wisudawan, S.T, M.T.

## **ABSTRACT**

Pipes placed on the seabed will change the neighbor of flow patterns. Changing the flow pattern can cause sediment move away from vicinity of the bottom of pipeline or commonly known as scouring. The scouring process causes the bottom of the pipe to lose the carrying capacity of the soil and affect the stability of the pipe. Scouring that occurs on the submarine pipeline can be observed in two dimensions or three dimensions. The initial process of scouring occurs at the center of the pipe which is usually approached in two dimensions until the depth or width of scouring is obtained and then the scouring spread occurs along the pipe which will form free span. At the stage where free span is formed due to scouring it can cause the pipe to become deflection into the scouring hole which can trigger the failure of the pipe itself.

In this final project will be seen how the influence of wave and current to scouring and variation of embedment  $e$  and pipe diameter to propagation scouring until free span formation. Parameters to be obtained from this thesis research is the depth of scouring, wide scouring, propagation speed along the pipe, the time required until the formation of free span and its relation to the depth of scouring.

**Keywords:** pipe diameter, mathematical modeling, subsea pipelines, the 2D profiles, scouring

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## KATA PENGANTAR

Limpahan rahmat dari Allah SWT yang telah memberikan kesempatan penulis untuk mengeyam pendidikan tinggi dan petunjuk yang telah diberikanNYA hingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Tugas Akhir yang berjudul **“ANALISIS PROPAGASI *SCOURING* DAN FREE SPAN PADA PIPA BAWAH LAUT DENGAN KONDISI *IN-TRENCH* AKIBAT PERGERAKAN GELOMBANG DAN ARUS”** merupakan salah satu syarat dalam menyelesaikan studi Kesarjanaan (S-1) di Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Tugas akhir ini membahas mengenai gerusan (*scouring*) pada pipa bawah laut akibat kombinasi gelombang dan arus yang mengenai pipa. Dalam Tugas Akhir ini dipaparkan hasil analisis mengenai pembentukan kedalaman *scouring* maksimum secara 2D dan laju persebaran secara longitudinal pipa. Pembentukan *scouring* sendiri dapat menimbulkan ancaman kerusakan seperti *local buckling*, *fatigue* maupun *fracture* dari free span yang terbentuk. Sehingga analisis *scouring* menjadi bagian penting bagi keamanan pipa bawah laut.

Laporan Tugas Akhir ini disusun dengan keterbatasan. Oleh karena itu terdapat bagian analisis yang masih bisa dikembangkan baik secara teoritis maupun praktik, sehingga saran dan koreksi dalam upaya perbaikan karya tulis ini sangat diharapkan demi kesempurnaan penulisan dan karya kami selanjutnya.

Surabaya, Juli 2017

Bagus Perkasa

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penyusunan laporan ini tidak lepas dari bantuan dan perhatian dari berbagai pihak. Dengan penuh rasa hormat & bangga, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Alm.Ayahanda Danu Bkti Robi'u dan Ibunda Ninik Sugiarti yang telah memberikan kesempatan dan kekuatan dalam menyelesaikan studi S1.
2. Keluarga penulis yang telah memberi dukungan dan do'a.
3. Keluarga besar Nourmalita Arifianti yang telah memberikan dukungan dan do'a.
4. Bapak Suntoyo, S.T., M.Eng., Ph.D. dan Bapak Agro Wisudawan, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing pengerjaan Tugas Akhir.
5. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc. Ph.D selaku dosen wali yang telah membimbing selama menjadi mahasiswa.
6. Seluruh dosen teknik kelautan yang telah memberikan wawasan baik akademik maupun tentang filosofi kehidupan yang berguna di masa mendatang.
7. Angkatan Varuna L30 yang telah menjadi keluarga pertama di jurusan teknik kelautan.
8. IECC BEM ITS sebagai organisasi yang telah menempa penulis dan membuka wawasan akan kepedulian pendidikan Indonesia.
9. HIMATEKLA yang telah memberikan kesempatan menempa diri dan berkembang khususnya perihal pengembangan sumber daya manusia.
10. Berbagai pihak yang telah membantu proses terselesaikannya karya tulis ini.

Semoga seluruh bimbingan, arahan, bantuan dan dukungan yang telah diberikan kepada penulis mendapat balasan yang lebih baik dari Allah SWT.

Penulis

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>COVER .....</b>	<b>ii</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>vii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>ix</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	5
1.3 Tujuan Penelitian .....	5
1.4 Manfaat Penelitian .....	5
1.5 Batasan Penelitian .....	6
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI .....</b>	<b>7</b>
2.1 Tinjauan Pustaka .....	7
2.2 Umum .....	8
2.3 Gelombang .....	10
2.3.1 Dasar Gelombang dan Klasifikasi Gelombang .....	11
2.3.2 Teori Gelombang Airy.....	12
2.3.3 Teori Gelombang Orde Tinggi Stoke .....	14
2.3.4 Gelombang Pecah .....	15
2.4 Scouring .....	18
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>31</b>
3.1 Diagram Metodologi .....	31
3.2 Deskripsi Alur .....	33
<b>BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>35</b>
4.1 Analisa Data Lingkungan .....	35

4.1.1 Gelombang Pecah .....	36
4.1.2 Menentukan Teori Gelombang .....	40
4.1.3 Hasil Perhitungan Kecepatan Dasar Partikel Gelombang .....	40
4.2 Hasil Perhitungan Kedalaman Maksimum Scouring .....	43
4.3 Hasil Perhitungan Lebar Scouring .....	60
4.4 Hasil Perhitungan Waktu Pembentukan Scouring Maksimum .....	63
4.5 Hasil Analisis Laju Propagasi Scouring Sepanjang Pipa .....	78
<b>BAB V PENUTUP .....</b>	<b>85</b>
5.1 Kesimpulan .....	85
5.2 Saran .....	86
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>xxi</b>
<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.1</b> Peta Sumber Daya Minyak dan Gas Bumi .....	1
<b>Gambar 1.2</b> Peta Saluran Pipa Gas PGN.....	2
<b>Gambar 1.3</b> Ilustrasi <i>Free Span</i> Pada Pipa Bawah Laut .....	3
<b>Gambar 1.4</b> Peta sebaran pipa PGN Sumatera Selatan – Jawa Barat.....	4
<b>Gambar 2.1</b> Grafik Klasifikasi Gelombang Berdasar Periode & Frekuensi .....	11
<b>Gambar 2.2</b> Grafik <i>Regions of validity for various wave theories</i> .....	13
<b>Gambar 2.3</b> Batas kecuraman gelombang di laut dalam .....	15
<b>Gambar 2.4</b> Indeks tinggi gelombang pecah .....	17
<b>Gambar 2.5</b> Indeks <i>dimensionless</i> kedalaman gelombang pecah .....	17
<b>Gambar 2.6</b> Proses Piping sehingga terjadi <i>scouring</i> .....	20
<b>Gambar 2.7</b> Proses Piping .....	21
<b>Gambar 2.8</b> <i>Lee wake effect</i> .....	22
<b>Gambar 2.9</b> Perkembangan <i>scouring</i> akibat arus .....	23
<b>Gambar 2.10</b> Grafik equilibrium <i>scouring</i> kombinasi arus & gelombang .....	25
<b>Gambar 2.11</b> Propagasi <i>scouring</i> sepanjang pipa .....	29
<b>Gambar 2.12</b> Amplification Factor pada bed shear stress .....	30
<b>Gambar 3.1.a</b> Diagram Alur Tahapan Pengerjaan .....	31
<b>Gambar 3.1.b</b> Diagram Alur Tahapan Pengerjaan .....	32
<b>Gambar 4.1</b> Layout pipa gas bawah laut SSWJ PGN .....	36
<b>Gambar 4.2</b> Grafik indeks gelombang pecah .....	37
<b>Gambar 4.3</b> Grafik indeks kedalaman gelombang pecah .....	38
<b>Gambar 4.4</b> Grafik indeks gelombang pecah .....	39
<b>Gambar 4.5</b> Grafik indeks kedalaman gelombang pecah .....	40
<b>Gambar 4.6</b> Grafik kedalaman <i>scouring</i> maksimum zona 1 D = 30 inch .....	45
<b>Gambar 4.7</b> Grafik kedalaman <i>scouring</i> maksimum zona 1 D = 32 inch .....	46
<b>Gambar 4.8</b> Grafik kedalaman <i>scouring</i> maksimum zona 1 D = 34 inch .....	47
<b>Gambar 4.9</b> Pipa zona 1 diameter 32 inch dan $e = -0.05D$ .....	48
<b>Gambar 4.10</b> Pipa zona 1 diameter 32 inch dan $e = -0.15D$ .....	48
<b>Gambar 4.11</b> Pipa zona 1 diameter 32 inch dan $e = -0.25D$ .....	49
<b>Gambar 4.12</b> Grafik kedalaman <i>scouring</i> maksimum zona 2 D = 32 inch .....	50

<b>Gambar 4.13</b> Pipa zona 2 diameter 32 inch dan $e = -0.05D$ .....	51
<b>Gambar 4.14</b> Pipa zona 2 diameter 32 inch dan $e = -0.15D$ .....	52
<b>Gambar 4.15</b> Pipa zona 2 diameter 32 inch dan $e = -0.25D$ .....	52
<b>Gambar 4.16</b> Grafik kedalaman <i>scouring</i> maksimum zona 3 $D = 32$ inch.....	54
<b>Gambar 4.17</b> Pipa zona 3 diameter 32 inch dan $e = -0.05D$ .....	55
<b>Gambar 4.18</b> Pipa zona 3 diameter 32 inch dan $e = -0.15D$ .....	55
<b>Gambar 4.19</b> Pipa zona 3 diameter 32 inch dan $e = -0.25D$ .....	56
<b>Gambar 4.20</b> Grafik kedalaman <i>scouring</i> maksimum zona 17-18 $D = 32$ inch .	57
<b>Gambar 4.21</b> Pipa zona 17-18 diameter 32 inch dan $e = -0.05D$ .....	58
<b>Gambar 4.22</b> Pipa zona 17-18 diameter 32 inch dan $e = -0.15D$ .....	59
<b>Gambar 4.23</b> Pipa zona 17-18 diameter 32 inch dan $e = -0.25D$ .....	59
<b>Gambar 4.24</b> Grafik jangka waktu <i>scouring</i> maksimum zona 1 $D = 30$ inch .....	65
<b>Gambar 4.25</b> Grafik jangka waktu <i>scouring</i> maksimum zona 1 $D = 32$ inch .....	67
<b>Gambar 4.26</b> Grafik jangka waktu <i>scouring</i> maksimum zona 1 $D = 34$ inch .....	69
<b>Gambar 4.27</b> Grafik jangka waktu <i>scouring</i> maksimum zona 2 $D = 32$ inch .....	72
<b>Gambar 4.28</b> Grafik jangka waktu <i>scouring</i> maksimum zona 3 $D = 32$ inch .....	75
<b>Gambar 4.29</b> Grafik jangka waktu <i>scouring</i> maks. zona 17-18 $D = 32$ inch .....	77



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Klasifikasi kondisi zona laut .....	12
<b>Tabel 4.1</b> Kilometer point zona yang digunakan .....	35
<b>Tabel 4.2</b> Jenis Tanah Setiap Zona pada Kondisi In-Trench .....	35
<b>Tabel 4.3</b> Data Gelombang dan Arus .....	36
<b>Tabel 4.4</b> Panjang dan Kecepatan Orbital Gelombang Pada Zona 1 .....	41
<b>Tabel 4.5</b> Panjang dan Kecepatan Orbital Gelombang Pada Zona 2 .....	41
<b>Tabel 4.6</b> Panjang dan Kecepatan Orbital Gelombang Pada Zona 3 .....	42
<b>Tabel 4.7</b> Panjang dan Kecepatan Orbital Gelombang Pada Zona 17-18 .....	42
<b>Tabel 4.8</b> <i>Scouring</i> maksimum zona 1 dengan $D = 30$ inch (0.762 m).....	44
<b>Tabel 4.9</b> <i>Scouring</i> maksimum Zona 1 dengan $D = 32$ inchi ( 0.813 m ).....	45
<b>Tabel 4.10</b> <i>Scouring</i> maksimum Zona 1 dengan $D = 34$ inchi ( 0.864 m ).....	46
<b>Tabel 4.11</b> <i>Scouring</i> maksimum Zona 2 dengan $D = 32$ inchi ( 0.813 m ).....	50
<b>Tabel 4.12</b> <i>Scouring</i> maksimum Zona 3 dengan $D = 32$ inchi ( 0.813 m ).....	53
<b>Tabel 4.13</b> <i>Scouring</i> maksimum Zona 17-18 dengan $D = 32$ inchi (0.813 m).....	57
<b>Tabel 4.14</b> Lebar <i>scouring</i> maksimum Zona 1 .....	61
<b>Tabel 4.15</b> Lebar <i>scouring</i> maksimum Zona 2 .....	61
<b>Tabel 4.16</b> Lebar <i>scouring</i> maksimum Zona 3 .....	62
<b>Tabel 4.17</b> Lebar <i>scouring</i> maksimum Zona 17-18 .....	62
<b>Tabel 4.18</b> <i>Time scale</i> Zona 1 diameter pipa 30 inchi dengan $e = -0.05D$ .....	64
<b>Tabel 4.19</b> <i>Time scale</i> Zona 1 diameter pipa 30 inchi dengan $e = -0.15D$ .....	64
<b>Tabel 4.20</b> <i>Time scale</i> Zona 1 diameter pipa 30 inchi dengan $e = -0.25D$ .....	65
<b>Tabel 4.21</b> <i>Time scale</i> Zona 1 diameter pipa 32 inchi dengan $e = -0.05D$ .....	66
<b>Tabel 4.22</b> <i>Time scale</i> Zona 1 diameter pipa 32 inchi dengan $e = -0.15D$ .....	66
<b>Tabel 4.23</b> <i>Time scale</i> Zona 1 diameter pipa 32 inchi dengan $e = -0.25D$ .....	67
<b>Tabel 4.24</b> <i>Time scale</i> Zona 1 diameter pipa 34 inchi dengan $e = -0.05D$ .....	68
<b>Tabel 4.25</b> <i>Time scale</i> Zona 1 diameter pipa 34 inchi dengan $e = -0.15D$ .....	68
<b>Tabel 4.26</b> <i>Time scale</i> Zona 1 diameter pipa 34 inchi dengan $e = -0.25D$ .....	69
<b>Tabel 4.27</b> <i>Time scale</i> Zona 2 diameter pipa 32 inchi dengan $e = -0.05D$ .....	70
<b>Tabel 4.28</b> <i>Time scale</i> Zona 2 diameter pipa 32 inchi dengan $e = -0.15D$ .....	71
<b>Tabel 4.29</b> <i>Time scale</i> Zona 2 diameter pipa 32 inchi dengan $e = -0.25D$ .....	71

<b>Tabel 4.30</b>	<i>Time scale</i> Zona 3 diameter pipa 32 inchi dengan $e = -0.05D$ .....	73
<b>Tabel 4.31</b>	<i>Time scale</i> Zona 3 diameter pipa 32 inchi dengan $e = -0.15D$ .....	74
<b>Tabel 4.32</b>	<i>Time scale</i> Zona 3 diameter pipa 32 inchi dengan $e = -0.25D$ .....	74
<b>Tabel 4.33</b>	<i>Time scale</i> Zona 17-18 diameter pipa 32 inchi dengan $e = -0.05D$ ...	76
<b>Tabel 4.34</b>	<i>Time scale</i> Zona 17-18 diameter pipa 32 inchi dengan $e = -0.15D$ ...	76
<b>Tabel 4.35</b>	<i>Time scale</i> Zona 17-18 diameter pipa 32 inchi dengan $e = -0.25D$ ...	77
<b>Tabel 4.36</b>	Laju propagasi <i>scouring</i> longitudinal zona 1 dengan $e = -0.05D$ .....	79
<b>Tabel 4.37</b>	Laju propagasi <i>scouring</i> longitudinal zona 1 dengan $e = -0.15D$ .....	79
<b>Tabel 4.38</b>	Laju propagasi <i>scouring</i> longitudinal zona 1 dengan $e = -0.25D$ .....	80
<b>Tabel 4.39</b>	Laju propagasi <i>scouring</i> longitudinal zona 2 dengan $e = -0.05D$ .....	80
<b>Tabel 4.40</b>	Laju propagasi <i>scouring</i> longitudinal zona 2 dengan $e = -0.15D$ .....	80
<b>Tabel 4.41</b>	Laju propagasi <i>scouring</i> longitudinal zona 2 dengan $e = -0.25D$ .....	81
<b>Tabel 4.42</b>	Laju propagasi <i>scouring</i> longitudinal zona 3 dengan $e = -0.05D$ .....	81
<b>Tabel 4.43</b>	Laju propagasi <i>scouring</i> longitudinal zona 3 dengan $e = -0.15D$ .....	82
<b>Tabel 4.44</b>	Laju propagasi <i>scouring</i> longitudinal zona 3 dengan $e = -0.25D$ .....	82
<b>Tabel 4.45</b>	Laju propagasi <i>scouring</i> longitudinal zona 17-18 $e = -0.05D$ .....	83
<b>Tabel 4.46</b>	Laju propagasi <i>scouring</i> longitudinal zona 17-18 $e = -0.15D$ .....	83
<b>Tabel 4.47</b>	Laju propagasi <i>scouring</i> longitudinal zona 17-18 $e = -0.25D$ .....	83

## DAFTAR LAMPIRAN

- LAMPIRAN A Tabel Kedalaman Scouring Zona 2, Zona 3, Zona 17-18
- LAMPIRAN B Propagasi *Scouring* Zona 1 Kondisi Diameter 32 Inch
- LAMPIRAN C Propagasi *Scouring* Zona 2 Kondisi Diameter 32 Inch
- LAMPIRAN D Propagasi *Scouring* Zona 3 Kondisi Diameter 32 Inch
- LAMPIRAN E Propagasi *Scouring* Zona 17-18 Kondisi Diameter 32 Inch
- LAMPIRAN F Grafik Propagasi *Scouring* terhadap Waktu Seluruh Zona
- LAMPIRAN G Grafik Laju Longitudinal Seluruh Zona
- LAMPIRAN H Syntax Pemodelan Numerik *Scilab*

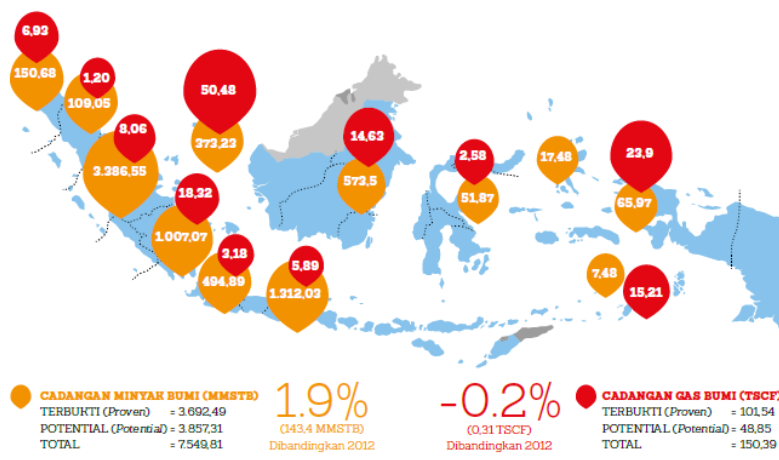
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB I

## PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Dewasa ini, Indonesia memiliki tantangan dalam hal pembangunan energi. Hasil olahan bumi atau biasa disebut energi fosil masih merupakan sumber utama untuk dikonsumsi di negara Indonesia dan seluruh dunia. Konsumsi sumber energi fosil sebesar 96% (minyak bumi 48%, gas 18% dan batubara 30%) dari total konsumsi secara nasional. Pada tahun 2013 cadangan potensial minyak pada tahun 2013 sebesar 3.85 miliar barel dan yang terbukti sebesar 3.69 miliar barel, sementara untuk cadangan gas bumi pada tahun 2012 sebesar 150.39 TSCF, dimana 101.54 TSCF untuk cadangan terbukti dan cadangan potensial sebesar 48.85 TSCF (Indonesia, Dewan Energi Nasional 2014). Berikut sebaran cadangan minyak dan gas di Indonesia pada gambar 1.1. Sumber Daya Minyak dan Gas Bumi



**Gambar 1.1.** Peta Sumber Daya Minyak dan Gas Bumi.

Sumber : Kementrian ESDM diolah oleh DEN ( 2014)

Untuk permasalahan energi khususnya gas, Indonesia membuat kebijakan mengenai konversi energi dari BBM ( Bahan Bakar Minyak ) ke BGG ( Bahan Bakar Gas ). Sebagian produksi gas bumi digunakan untuk memenuhi kebutuhan domestik di sektor industri, PLN, gas kota, gas lift dan reinjection, serta own use. Penggunaan

gas bumi ini dioptimalkan karena bahan bakar gas bumi relatif lebih murah dan bersih dibandingkan BBM. Namun meski kebijakan sudah dicanangkan, masih terdapat hal yang menghambat dalam proses pemanfaatan sumber energi gas yaitu mengenai permasalahan infrastruktur. Sebagian besar cadangan gas bumi terletak di luar pulau Jawa, sedangkan sebagian besar konsumen berada di pulau Jawa dan juga masih banyak daerah di luar Jawa yang perlu diperhatikan supaya distribusinya merata. Karenanya dibutuhkan fasilitas infrastruktur yang memadai untuk memenuhi . Salah satu fasilitas infrastruktur yang telah dimanfaatkan saat ini untuk proses pengiriman komoditi ini adalah pipa baik di darat maupun di laut.

Dalam *oil & gas industry*, saluran pipa bawah laut memiliki kelebihan yaitu kuantitas besar, jarak yang jauh dan lebih ekonomis dalam jangka waktu yang panjang. Desain dari pipa dapat mencapai ratusan hingga ribuan kilometer, memiliki diameter dari 20 – 30 cm hingga lebih dari 1.0 meter, dari kedalaman 5 m hingga lebih dari 100 m. Umur rencana pipa didesain mencapai 30 tahun operasi. Menurut data PGN sebagai perusahaan BUMN Indonesia, mereka memiliki jaringan sepanjang 2.283 km yang disalurkan dari produsen ke stasiun pembeli dan memiliki saluran distribusi natural gas sepanjang 4.742 km yang di hubungkan ke pemabangkit listrik, industri, bisnis komersial berupa hotel, restaurant maupun rumah sakit. Berikut peta pipa transmisi yang dimiliki PGN pada gambar 1.2. Peta Saluran Pipa Gas PGN.



**Gambar 1.2.** Peta Saluran Pipa Gas PGN

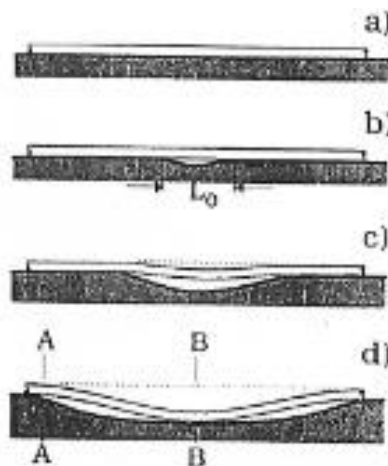
Sumber : ( PGN, Indonesia. *Maps of our operations*. Tersedia :

[http://www.pgn.co.id/en/pages/location/our\\_operations/locations/0](http://www.pgn.co.id/en/pages/location/our_operations/locations/0) )

Perancangan pipa harus memperhatikan aspek keselamatan yang tinggi, baik untuk stabilitas pipa ketika operasi, maupun isu pencemaran laut yang dapat mengganggu ekosistem. Dikarenakan bila terjadi kecelakaan pada pipa contohnya meledaknya pipa gas maka kerugian yang ditanggung akan sangat besar. Untuk itu terdapat beberapa badan Internasional memberikan *recommended practice* untuk pedoman supaya perancangan pipa aman dan tidak mengganggu ekosistem.

Berkaitan aspek keselamatan pipa, terdapat satu fenomena yang menjadi perhatian khusus yaitu fenomena *scouring* dimana keberadaan dari pipa dapat merubah perilaku bentuk aliran disekitarnya sehingga memicu terjadi fenomena tersebut. *Scouring* atau penggerusan adalah fenomena *seabed* yang tergerus akibat adanya aliran pada bawah pipa yang cukup besar untuk memindahkan sedimen.

*Scouring* akan menyebabkan *free span* yang sudah dicantumkan dalam salah satu *recommended practice* DnV F105. *Free span* merupakan kondisi dimana pipa membentang bebas tanpa ada penopang dibawahnya. Ini biasanya terjadi karena dasar laut yang tidak rata dan ditambah jika terjadi *scouring*. Ketika bentangan *free span* semakin besar tentu akan membahayakan stabilitas pipa dan mempercepat proses *fatigue* karena tegangan akibat defleksi pipa dan bisa mengakibatkan kegagalan pipa. Oleh karenanya, dibutuhkan tingkat keamanan yang sangat tinggi dan perlu dilakukanan inspeksi dalam kurun waktu tertentu. Inspeksi bertujuan untuk memastikan dan melihat kondisi pipa apakah masih aman atau perlu dilakukan tindakan preventif.

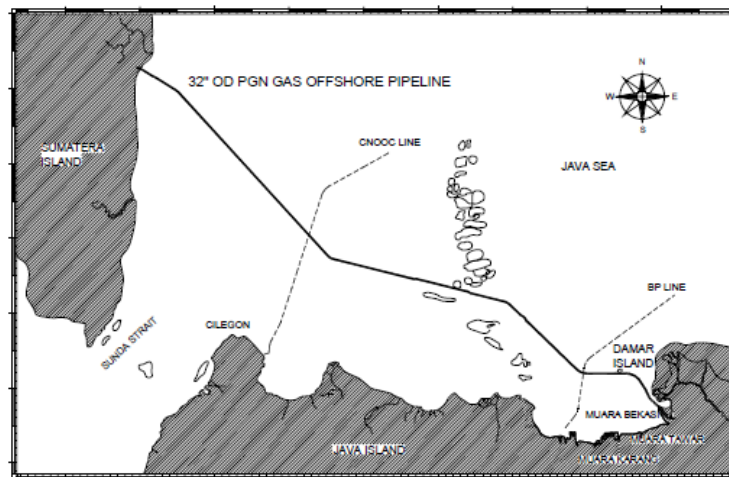


**Gambar 1.3.** Ilustrasi *Free Span* Pada Pipa Bawah Laut

Sumber : Sumer B.M dan Fredsoe J ( 2002 )

Penelitian mengenai *scouring* pada pipa masih sangat sedikit bila dibandingkan oleh subjek penelitian yang lain. Ilmu pengetahuan mengenai *scouring* juga baru berkembang dalam beberapa dekade. Beberapa peneliti dari luar seperti Mao, Sumer, Fredsøe, Terzaghi, Hansen, Cheng melakukan banyak penelitian mengenai *scouring* pada pipa dengan beberapa kondisi masing-masing yang dapat digunakan untuk membantu dalam pengerjaan tugas akhir ini. Penelitian mengenai *scouring* pada pipa gas bawah laut juga telah dilakukan oleh Nugraha 2012, Pebriantina 2016, Budiarti 2016 yang mengangkat topik mengenai propagasi *scouring*, vortex maupun kesetimbangan kedalaman *scouring*. Sehingga, dari masing-masing penelitian tersebut dapat digunakan sebagai referensi untuk membantu penyusunan tugas akhir ini.

Data yang diperoleh untuk dilakukan penelitian mengenai *scouring* merupakan data dari proyek pipa gas bawah laut PGN SSWJ ( South Sumatera – West Java ) merupakan pipa transmisi berukuran 32 inchi yang menyuplai gas alam dari Labuhan Maringgai Sumatera Selatan menuju Muara Tawar di Bekasi Jawa Barat dan memiliki panjang sekitar 160 km. Pipa ini merupakan SSWJ *phase II Offshore Pipeline*. Proyek ini akan dijadikan objek studi tugas akhir untuk analisa *scouring*. Analisa yang akan dilakukan adalah perhitungan *scouring* dua dimensi untuk menentukan laju propagasi sepanjang pipa sehingga membentuk free span pada pipa bawah laut.



**Gambar 1.4.** Peta sebaran pipa PGN Sumatera Selatan – Jawa Barat

Sumber : Laporan *Design Basic Manual Pipeline Offshore* PGN (2005)



## 1.2 Rumusan Masalah

Meninjau dari latar belakang maka permasalahan yang dianalisa dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Berapakah kedalaman *scouring* maksimal, lebar *scouring*, dan jangka waktu terbentuknya kedalaman *scouring* maksimal?
2. Bagaimana hubungan antara rasio jarak kedalaman (*embedment*)  $e$ , diameter pipa, *KC number* dan perbandingan kecepatan arus & gelombang terhadap kedalaman *scouring* maksimal dan jangka waktu pembentukan *scouring* maksimal?
3. Berapakah laju propagasi *scouring* sepanjang pipa bawah laut?
4. Bagaimana hubungan rasio jarak kedalaman  $e$  dan diameter pipa terhadap laju *scouring* sepanjang pipa?

## 1.3 Tujuan Penelitian

1. Untuk mengetahui perhitungan proses terjadinya kedalaman *scouring* maksimal, lebar *scouring* serta jangka waktu terbentuknya kedalaman *scouring* sampai terjadi kesetimbangan pada pipa bawah laut.
2. Mengetahui hubungan rasio  $e$  dan diameter, nilai *KC number*,  $U_c/(U_c+U_w)$  akibat pergerakan arus dan gelombang terhadap pembentukan *scouring*.
3. Menghitung laju propagasi sepanjang pipa bawah laut.
4. Mengetahui hubungan rasio jarak kedalaman  $e$  dan diameternya terhadap laju *scouring*.

## 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah dapat mengetahui perhitungan terbentuknya kedalaman *scouring* dan jangka waktu pada pipa bawah laut akibat pergerakan gelombang dan arus kondisi *in trench*. Serta dapat mengetahui efek dari fenomena *scouring* terhadap kondisi *sea bed* yang nantinya dapat digunakan sebagai perhitungan lebih lanjut pada analisis kegagalan pipa bawah laut.

### 1.5 Batasan Masalah

Dalam pengerjaan tugas akhir ini akan diberikan batasan masalah untuk memudahkan analisa dan tetap dalam lingkup bahasan seperti berikut :

1. Model perhitungan secara 2D.
2. Kondisi peletakan pipa secara *in trench*.
3. Kemiringan *sea bed* diabaikan.
4. Arah sudut datang arus dan gelombang  $90^\circ$  terhadap pipa (tegak lurus pipa).
5. Diameter pipa yang divariasikan adalah 30 inch, 32 inch dan 34 inch.
6. Variasi  $e$  adalah  $-0.05 D$ ,  $-0.15 D$  dan  $-0.25 D$  dari *outer diameter* pipa.
7. Pipa meletak secara fix dan tidak mengalami vibrasi maupun sagging.

## BAB II

### Tinjauan Pustaka & Dasar Teori

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

*Submarine pipelines* merupakan suatu sistem terpadu yang dibangun di laut untuk menyalurkan *oil & gas* pada anjungan lepas pantai sampai ke darat ataupun dari satu pulau ke pulau lain. Proses penyaluran menggunakan pipa merupakan salah satu fasilitas yang ekonomis dibandingkan fasilitas penyalur lainnya. Salah satu faktor yang perlu dipertimbangkan dalam proses desain stabilitas pipa adalah *scour around pipeline* ( B.M Sumer dan Fredsøe 1992 ). *Onset of Scour* atau bisa disebut sebagai permulaan terjadi penggerusan berhubungan dengan *seepage flow* ( aliran rembesan ) yang terjadi dibawah permukaan pipa, disebabkan oleh perbedaan tekanan pada *upstream* dan *downstream* pada pipa. Ketika terus menerus bagian bawah terkena aliran maka pada suatu saat pasir pada bagian *downstream* mulai naik dan akan terjadi pencampuran antara air dan pasir dibagian bawah pipa ( Terzaghi 1948 ).

Menurut Fredsøe & Sumer (1991) percobaan untuk menentukan kondisi kritis yang ditunjukkan dengan dua parameter yaitu Keulegan-Carpenter Number KC, dan rasio peletakan dan diameter pipa. Menurut Sumer (2001) yang melanjutkan penelitian mengenai permulaan *scour* yang disebabkan oleh kombinasi arus dan gelombang. Menurut Graven & Fredsøe (1983) dalam Sumer & Fredsoe (2002) memberikan perhitungan bagaimana menyesuaikan perhitungan hasil model pada kondisi alam. Menurut Hansen et.al (1991) memberikan rumus empiris bagaimana memprediksikan laju persebaran *scouring* di sepanjang pipa.

Cheng et.al (2013) melakukan eksperimen mengenai *scour* secara tiga dimensi pada pipa dengan pengaruh gelombang saja dan kombinasi arus dan gelombang. Eksperimen dilakukan untuk mengamati kecepatan propagasi *scouring* (*free span expansion rate*) sepanjang pipa. *Scouring* sepanjang pipa menyebar secara konstan dibawah pengaruh gelombang saja. Laju propagasi *scouring* menurun dengan bertambahnya kedalaman tanam ( $e$ ), namun, bertambah dengan meningkatnya *Keulegan-Carpenter ( KC ) number*. Dibawah pengaruh gelombang dan arus, efek dari rasio kecepatan pada kecepatan propagasi *scouring* sepanjang pipa telah diukur.

Hubungan secara empiris antara laju propagasi ( $V_h$ ) dan parameter kunci seperti  $KC$  number dan *embedment depth* ( $e/D$ ) telah ditetapkan berdasarkan hasil eksperimen.

Nugraha (2012) meneliti jalur pipa gas transmisi bawah laut SSWJ dengan menghubungkan fenomena *scouring* dengan *freespan* yang dapat menyebabkan defleksi pada pipa dan dari hasil penelitian menunjukkan bahwa pada tiap zona yang diamati menghasilkan frekuensi natural yang lebih besar daripada frekuensi *vortex shedding* sehingga osilasi pada pipa akibat *vortex* tidak terjadi .

Pebriantina (2016) meneliti pipa gas transmisi bawah laut SSWJ dengan menghubungkan fenomena *scouring* pada pipa kondisi *in trench* dengan variasi kedalaman tanam dan hasil dari penelitiannya menyimpulkan bahwa penggerusan tidak terjadi ketika pipa terkubur sepenuhnya (sempurna), yakni nilai  $e$  (*gap ratio*) sama besar dengan ukuran diameter pipa ( $D$ ) dan/atau lebih besar dari ukuran diameter pipa tersebut. Semakin meningkatnya nilai  $e/D$ , maka kedalaman *scour* akan menurun. Semakin besar diameter pipa, kedalaman dan lebar gerusan semakin besar. Pada kondisi yang sama ( $d$ ,  $U_m$  dan  $U_c$  sama), nilai  $T^*$  dan  $St$  akan berbeda apabila besarnya ukuran pipa (diameter) diubah. Semakin besar diameter pipa, nilai  $St$  semakin kecil sehingga waktu yang dibutuhkan agar terjadi gerusan maksimal juga semakin lama.

Budiarti (2016) juga meneliti pipa gas bawah laut SSWJ dan hasilnya menunjukkan bahwa ada indikasi keterkaitan antara kedalaman perairan serta *gap/clearance* yang telah divariasikan dengan kedalaman dan lebar *scouring* yang dihasilkan. Semakin dalam suatu perairan, maka kedalaman dan lebar *scouring* yang dihasilkan akan semakin kecil dan sebaliknya. Kedalaman maupun lebar lubang *scour* yang dihasilkan merupakan dampak dari berubahnya kecepatan orbital gelombang sehingga mempengaruhi nilai Keulegan-Carpenter Number dan kecepatan efektif antara arus dengan orbital gelombang. Selain itu, analisa terhadap perilaku *scouring* akibat variasi jarak *clearance* pipa terhadap *seabed* menunjukkan bahwa semakin besar gap yang terjadi, maka lubang *scour* akan semakin mengecil. Dalam hal ini kedalaman *scouring* yang terbesar adalah pada saat pipa meletak pada *seabed* ( $E=0$ ).

## 2.2 Umum

Dalam pemasangan *submarine pipeline* memiliki tahapan. Tahap pertama yaitu survei perencanaan pemasangan *submarine pipeline* atau disebut juga sebagai *geophysical pre-engineering route survey for pipeline installation*. Tujuan tahap

pertama adalah untuk mengetahui topografi dasar laut, *existing pipeline and cable*, bangkai kapal ataupun ancaman dari alam. Tahap kedua adalah *Pre-Lay Survey* dimana bertujuan untuk validasi data yang diperoleh dari tahap pertama sebelum instalasi dilaksanakan. Tahap ketiga yaitu *as-laid survey* yang bertujuan untuk mencatat posisi dan letak pipa serta statusnya setelah instalasi dan tahap ini merupakan tahap terakhir pemasangan pipa bawah laut. Selanjutnya yang perlu dilakukan adalah inspeksi secara berkala untuk memastikan keamanan pipa. Analisa *scouring* dapat termasuk tahap ketiga maupun setelahnya karena fenomena *scouring* terjadi seketika terjadi ketika pipa meletak pada *seabed*.

Terdapat empat klasifikasi umum menurut *Mousselli*, dari offshore pipeline, tergantung dari fungsi saluran. Ukuran pipa dan tekanan saat operasi dapat menentukan klasifikasi dari pipa. Klasifikasi adalah sebagai berikut

a. Flowlines ( Intrafield Lines )

Flowlines menghubungkan sumur sampai ke platform atau subsea manifold. Pada umumnya memiliki ukuran diameter yang kecil dan dikelompokkan menjadi satu. Aliran dalam pipa memiliki tekanan yang tinggi. Flowlines digunakan ketika tekanan reservoir cukup untuk mengalirkan fluida sampai ke pipa tanpa menggunakan boost pump atau compressor.

b. Gathering Lines ( Interfield Lines )

Gathering Lines menghubungkan dari satu platform ke platform lainnya dan memiliki ukuran diameter yang kecil, medium dan besar juga. Saluran kemungkinan dikelompokkan menjadi oil, gas, condensate atau aliran dua fase. Rentang tekanan operasi biasanya antara 1000 – 1400 psi. Aliran dari saluran dibantu menggunakan boost pump atau compressor yang biasanya diinstal pada platform. Gathering line juga mengirimkan produk dari platform untuk memisahkan dari production platform.

c. Trunk Lines

Trunk lines merupakan kombinasi aliran dari satu atau banyak platform ke pantai. Saluran memiliki diameter besar dan biasanya untuk oil atau gas. Boost pump atau compressor harus disediakan pada platform untuk saluran yang sangat panjang.

Trunk lines merupakan carrier paling umum, membawa produk dari banyak producer.

d. Loading ( Unloading Lines )

Saluran ini menghubungkan production platform dan fasilitas muatan atau subsea manifold dan fasilitas muatan. Saluran dapat memiliki diameter yang besar atau kecil dan membawa cairan saja. Saluran yang terhubung dapat dari fasilitas pantai ke terminal offshore loading atau unloading. Loading lines memiliki rentang jarak yang pendek antara 1 – 3 miles, untuk unloading lines memiliki panjang sekitar 21 miles.

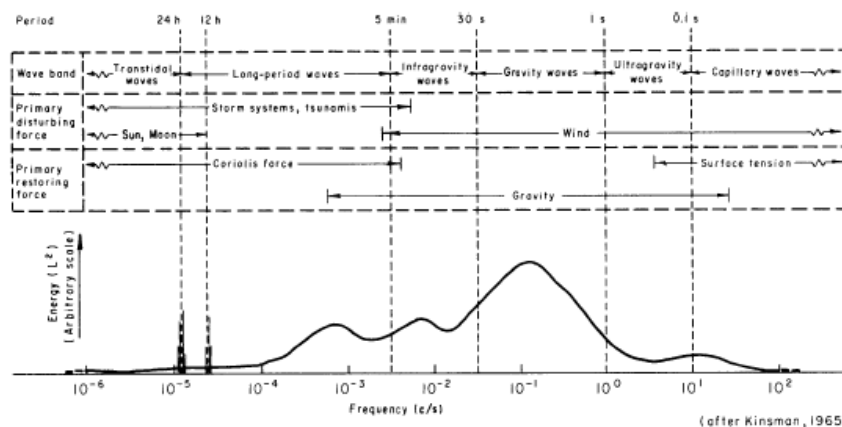
### 2.3 Gelombang

Gelombang merupakan sumber energi yang penting dalam pembentukan pantai, transport sedimen dasar laut dari offshore ke onshore atau sepanjang pantai, dan menyebabkan gaya paling signifikan pada struktur di laut. Fenomena gelombang cukup kompleks dan susah di deskripsikan secara matematika karena memiliki karakteristik non linier, tiga dimensi, dan acak. Pembangkitan gelombang dapat disebabkan oleh angin dan gravitasi serta dapat juga dari gempa yang nantinya akan menyebabkan gelombang tsunami.

Terdapat beberapa teori gelombang yang dapat digunakan seorang *engineer* dalam melakukan perhitungan karakteristik gelombang. Paling sederhana adalah teori gelombang airy yang menghitung gelombang dengan pendekatan linier. Terdapat teori gelombang stoke yang dapat digunakan untuk perhitungan gelombang non linier.

### 2.3.1 Dasar Gelombang dan Klasifikasi Gelombang

Penjelasan mengenai gelombang meliputi bentuk dari permukaan dan pergerakan fluida di bagian bawah. Gelombang yang dapat dijelaskan secara matematika sederhana disebut simple wave sebagai contohnya adalah gelombang sinusoidal atau simple harmonic waves dimana profil permukaannya dapat dijelaskan menggunakan fungsi sinus atau cosinus yang sederhana. Gelombang yang tersusun dari beberapa komponen dan sulit untuk dijelaskan secara matematika disebut complex waves. Bentuk gelombang yang gerakannya relatif tetap pada satu titik disebut progressive wave, arah dari gerakan merupakan persebaran gelombangnya. Jika gelombang hanya bergerak naik turun pada satu titik disebut complete standing wave atau clapotis. Ketika progressive waves tidak mengalami perubahan bentuk di permukaannya maka termasuk permanent form.



**Gambar 2.1** Grafik Klasifikasi Gelombang Berdasar Periode & Frekuensi menurut Kinsman (1965) dalam *US Army Corps of Engineering* (1984).

### 2.3.2 Teori Gelombang Airy

Komponen dasar dari gelombang sinusoidal adalah panjang gelombang  $L$ , tinggi gelombang  $H$ , periode gelombang  $T$  dan kedalaman  $d$  (dihitung dari SWL sampai ke dasar laut).

- Kecepatan Gelombang, Panjang Gelombang dan Periode.

Kecepatan gelombang dapat diekspresikan sebagai berikut

$$C = \frac{L}{T} \quad (2.1)$$

Hubungan antara kecepatan gelombang dan kedalaman adalah sebagai berikut

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \quad (2.2)$$

Atau

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (2.3)$$

Fungsi dari nilai panjang gelombang adalah sebagai berikut

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (2.4)$$

Atau

$$L \approx \frac{gT^2}{2\pi} \sqrt{\tanh\left(\frac{4\pi^2 d}{T^2 g}\right)} \quad (2.5)$$

Dimana

C = kecepatan gelombang ( m/s )

g = gravitasi ( m/s<sup>2</sup> )

d = kedalaman ( m )

L= panjang gelombang ( m )

Berdasarkan klasifikasi dari gelombang dapat dibagi persamaannya menjadi sebagai berikut

**Tabel 2.1** Klasifikasi kondisi zona laut

Klasifikasi	d/L	d/L <sub>0</sub>	tanh(2πd/L)
Deep water	>0.5	>π	≈1
Transitional	0.4 sampai 0.5	1/4 sampai π	tanh(2πd/L)
Shallow Water	<0.4	<0.25	≈2πd/L

Pada kondisi deep water

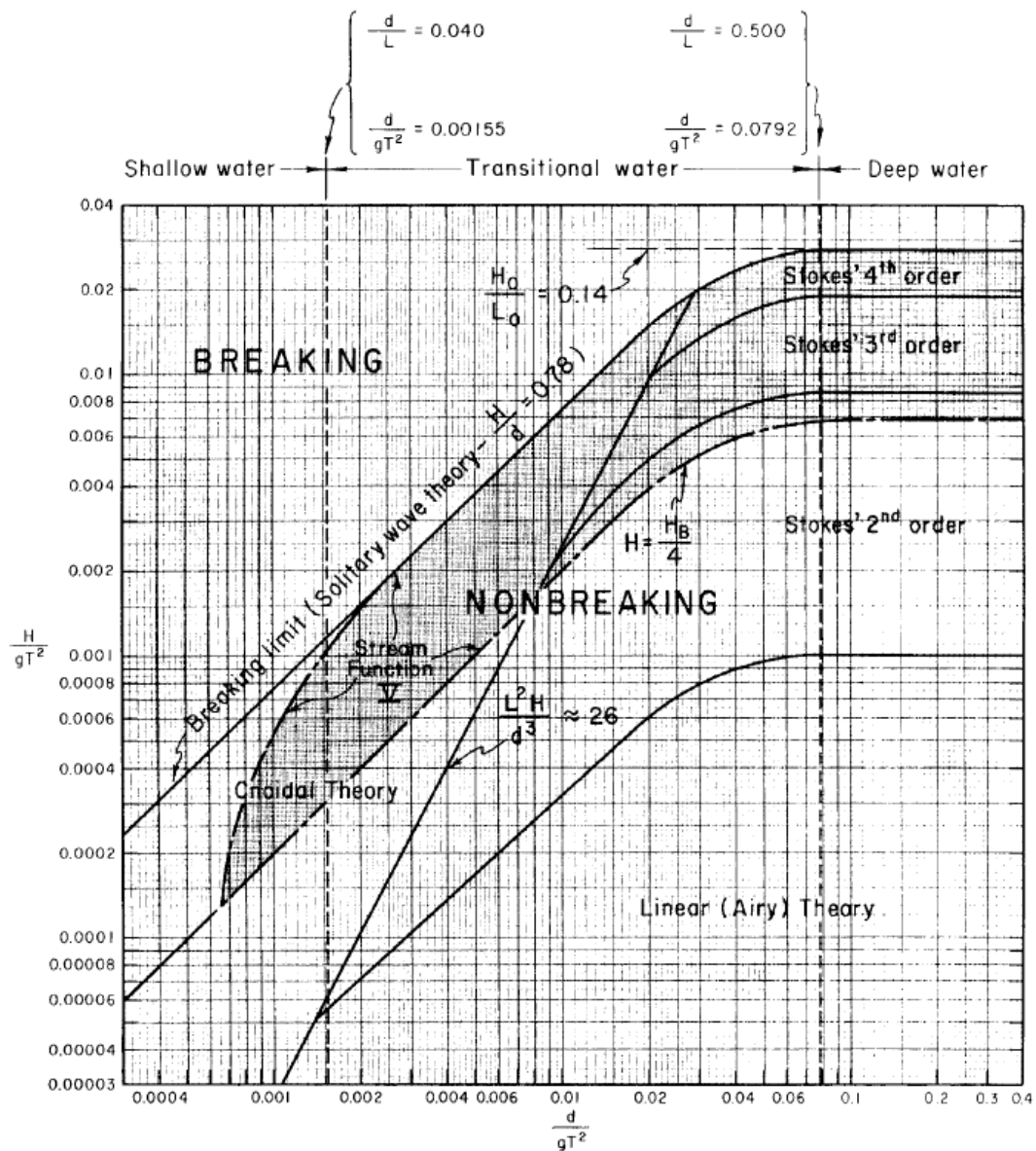
$$Co = \sqrt{\left(\frac{gL_0}{2\pi}\right)} = \frac{L_0}{T} \quad (2.6)$$



Dan

$$Co = \frac{gT}{2\pi} \quad (2.7)$$

Untuk mengetahui teori gelombang yang akan dipakai dapat di tentukan dengan grafik seperti pada gambar 2.1 Grafik daerah validasi untuk teori gelombang. Dengan memasukkan parameter dari  $\left[\frac{H}{gT^2}\right]$  dan  $\left[\frac{d}{gT^2}\right]$



**Gambar 2.2** Grafik *Regions of validity for various wave theories.*

Sumber : *US Army Corps of Engineering ( 1984 )*

### 2.3.3 Teori Gelombang Orde Tinggi Stoke

#### a. Stokes Orde II

Untuk perhitungan gelombang stokes orde dua, profil permukaan gelombang adalah sebagai berikut

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \theta + \left( \frac{\pi H^2}{8L} \right) \frac{\cosh(2\pi d/L)}{\sinh^3(2\pi d/L)} \left[ 2 + \cosh(4\pi d/L) \right] \cos 2\theta \quad (2.8)$$

Untuk kecepatan partikel gelombang adalah sebagai berikut

$$u = \frac{HgT}{2L} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\sinh^4(2\pi d/L)} \cos \theta + \frac{3}{4} \left( \frac{\pi H}{L} \right)^2 C \frac{\cosh[4\pi(z+d)/L]}{\sinh^4(2\pi d/L)} \cos 2\theta \quad (2.9)$$

$$w = \frac{\pi H}{L} C \frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\sinh(2\pi d/L)} \sin \theta + \frac{3}{4} \left( \frac{\pi H}{L} \right)^2 C \frac{\sinh[4\pi(z+d)/L]}{\sinh^4(2\pi d/L)} \sin 2\theta \quad (2.10)$$

#### b. Stokes orde III

Untuk perhitungan gelombang stokes orde tiga, profil permukaan gelombang adalah sebagai berikut

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \theta + \frac{\pi H^2}{4L} f_2 \left( \frac{d}{L} \right) \cos 2\theta + \frac{\pi^2 H^3}{8L^2} f_3 \left( \frac{d}{L} \right) \cos 3\theta \quad (2.11)$$

Dimana,

$$f_2 \left( \frac{d}{L} \right) = \frac{(2 + \cosh(2\pi d/L)) \cosh(2\pi d/L)}{2 \sinh^3(2\pi d/L)} \quad (2.12)$$

$$f_3 \left( \frac{d}{L} \right) = \frac{3}{4} \frac{1 + 8 \cosh^3(2\pi d/L)}{\sinh^6(2\pi d/L)} \quad (2.13)$$

Untuk kecepatan partikel gelombang adalah sebagai berikut

$$u = C \left( F_1 \cosh \left( \frac{2\pi d}{L} \right) \cos \theta + F_2 \cosh 2 \left( \frac{2\pi d}{L} \right) \cos 2\theta + F_3 \cosh 3 \left( \frac{2\pi d}{L} \right) \cos 3\theta \right) \quad (2.14)$$

$$w = C \left( F_1 \sinh \left( \frac{2\pi d}{L} \right) \sin \theta + F_2 \sinh 2 \left( \frac{2\pi d}{L} \right) \sin 2\theta + F_3 \sinh 3 \left( \frac{2\pi d}{L} \right) \sin 3\theta \right) \quad (2.15)$$

Dimana,

$$F_1 = \frac{kH}{2 \sinh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} - \left(\frac{kH}{2}\right)^2 \frac{\cosh^2\left(\frac{2\pi d}{L}\right)(1+5\cosh^2\left(\frac{2\pi d}{L}\right))}{8\sinh^5\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \quad (2.16)$$

$$F_2 = \frac{3}{4} \left(\frac{2\pi dH}{2L}\right)^2 \frac{1}{\sinh^4\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \quad (2.17)$$

$$F_3 = \frac{3}{64} \left(\frac{2\pi H}{2L}\right)^3 \frac{11-2\cosh^2\left(\frac{2\pi d}{L}\right)}{\sinh^7\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \quad (2.18)$$

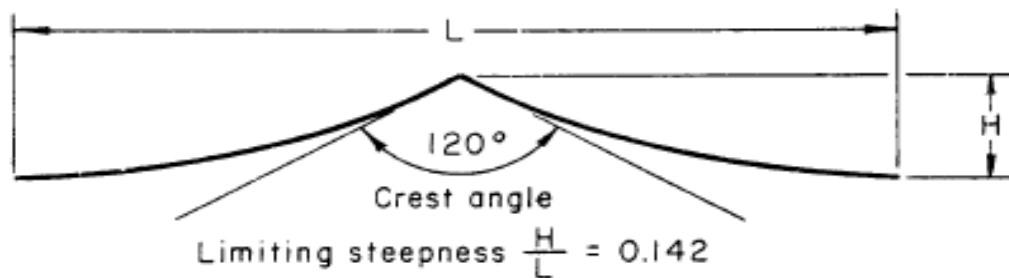
### 2.3.4 Gelombang Pecah

#### a. *Deep Water*

Ketinggian maksimum pada gelombang yang menjalar pada laut dalam dibatasi oleh kecuraman maksimum gelombang. Ketika gelombang melampaui batas kecuraman gelombang maka akan terjadi gelombang pecah. Michell (1893) memberikan batas kecuraman gelombang adalah sebagai berikut

$$\frac{H_o}{L_o} = 0.142 \approx \frac{1}{7} \quad (2.19)$$

Sudut gelombang yang terjadi adalah seperti gambar dibawah ini



Gambar 2.3 Batas kecuraman gelombang di laut dalam

Sumber : *US Army Corps of Engineering (1984)*

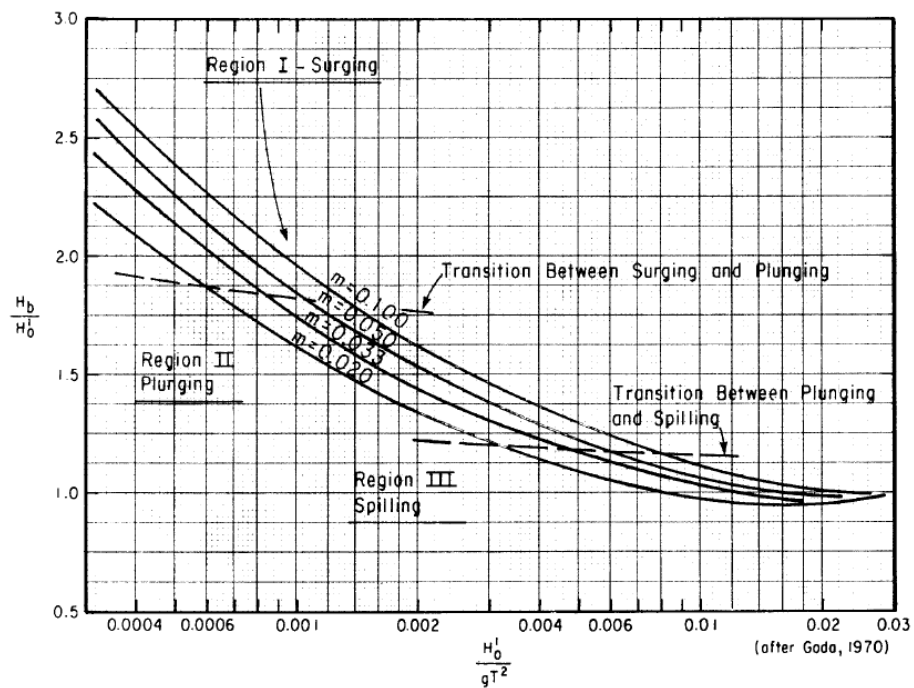
*b. Shoaling Water*

Ketika gelombang bergerak ke daerah *shoaling*, batasan kecuraman yang dapat dicapai semakin berkurang, menjadi fungsi relatif terhadap  $d/L$  dan kemiringan batimetri pantai  $m$ , tegak lurus terhadap arah gelombang. Penjalaran gelombang laut dalam memasuki perairan dangkal akan menyebabkan pecahnya gelombang, kedalaman dari penyebab pecahnya gelombang di notasikan dengan  $db$ . Munk (1949) memberikan formula dengan modifikasi dari gelombang soliter yang menghubungkan tinggi gelombang pecah  $H_b$ , kedalaman gelombang pecah  $db$ , tinggi gelombang laut dalam, dan panjang gelombang laut dalam. Formulasnya adalah sebagai berikut

$$\frac{H_b}{H'_o} = \frac{1}{3.3 \left( \frac{H'_o}{L_o} \right)^{1/3}} \quad (2.20)$$

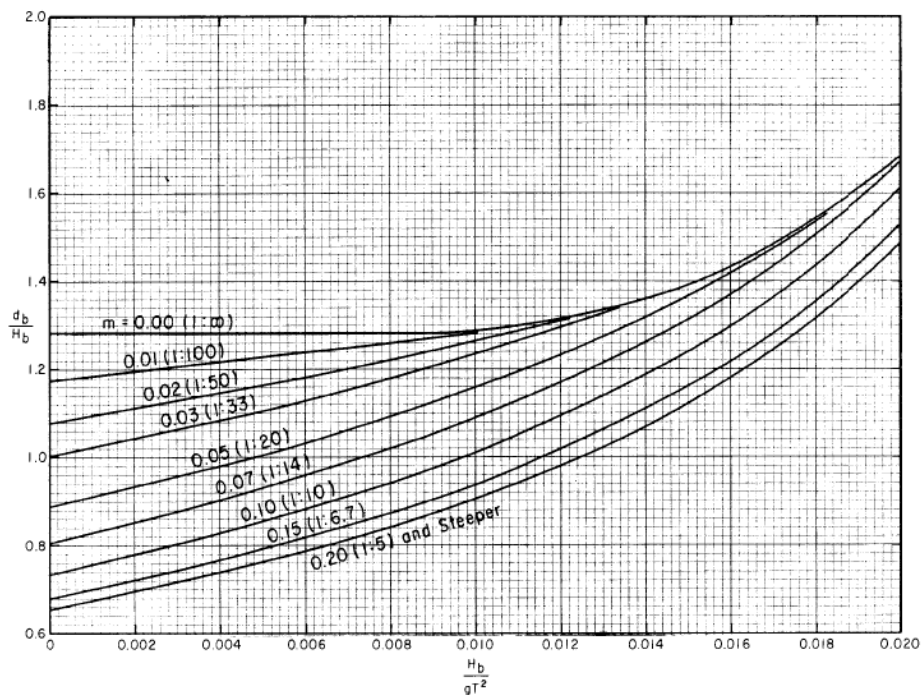
$$\frac{d_b}{H_b} = 1.28 \quad (2.21)$$

Rasio  $H_b/H'_o$  merupakan bentuk dari indeks tinggi gelombang pecah. Peneliti seperti Iversen (1952.1953), Calvin (1969) dan Goda (1970) menyimpulkan bahwa  $H_b/H'_o$  dan  $db/H_b$  tergantung dari kemiringan dasar laut dan kecuraman gelombang. Seperti pada gambar 2.4 bagaimana grafik dari Goda memberikan penjelasan hubungan antara  $H_b/H'_o$  dan  $H_o/L_o$  di beberapa kemiringan dasar laut. Pada gambar 2.5 grafik yang didapatkan oleh Weggel akan menunjukkan hubungan antara  $db/H_b$  dan  $H_b/gT^2$  untuk beberapa kemiringan dasar laut.



**Gambar 2.4** Indeks tinggi gelombang pecah

Sumber : *US Army Corps of Engineering (1984)*



**Gambar 2.5** Indeks *dimensionless* kedalaman gelombang pecah

Sumber : *US Army Corps of Engineering (1984)*

## 2.4 Scouring

Terdapat dua kategori untuk *scouring* yaitu yang pertama adalah *clear water scour* dan yang kedua adalah *live bed scour*. Pada kasus *clear water scour*, tidak terjadi pergerakan sedimen yang terangkat jauh dari struktur ( $\theta < \theta_{cr}$ ), sementara untuk *live bed scour* sedimen tersebar diseluruh dasar ( $\theta > \theta_{cr}$ ). Nilai dari  $\theta$  yaitu *undisturbed Shields parameter* didefinikan sebagai berikut :

$$\theta_c = \frac{U_f^2}{g(s-1)d} \quad (2.22)$$

Dengan :

$$U_{fc} = \frac{U_c}{(2.5 \times (\ln(\frac{30h}{ks})) - 1)} \quad (2.23)$$

$$ks = 2.5 \times d_{50} \quad (2.24)$$

Dimana :  $U_f$  = kecepatan *undisturbed bed shear stress*

$h$  = kedalaman perairan

$ks$  = kekasaran pipa

$g$  = gravitasi

$d$  = *grain size*

Untuk Shield Parameter untuk kasus gelombang saja adalah sebagai berikut (*Soulsby, 1997*)

$$\theta_w = \frac{\tau_w^2}{\rho g (\rho_s / \rho - 1) d_{50}} \quad (2.25)$$

Dengan,

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w U_w^2 \quad (2.26)$$

$$f_w = 0.237 r^{-0.52} \quad (2.27)$$

$$r = \frac{U_w T}{2\pi k_s} \quad (2.28)$$

Dimana :

$\theta_w$  = Shield parameter *undisturbed bed shear stress under wave condition*

$\tau_w$  = tegangan geser (*shear stress*) untuk aliran *undisturbed under wave action*

$U_w$  = kecepatan orbital gelombang

$f_w$  = *wave friction factor*

$k_s$  = *nikuradse equivalent sand grain roughness*

Untuk shield parameter kombinasi arus dan gelombang ( $\theta_{cw}$ ) dapat digunakan formula sebagai berikut ( Camenen, 2004 ), dimana  $\phi$  merupakan sudut antara pipa dan arah datang gelombang dan arus.

$$\theta_{cw} = (\theta_c^2 + \theta_w^2 + 2 \theta_w \theta_c \cos \phi)^{1/2} \quad (2.29)$$

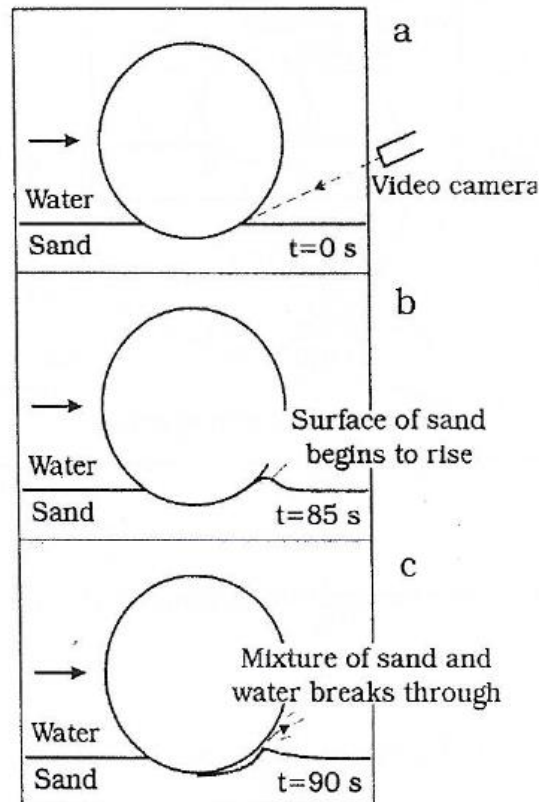
Ketika *pipeline* diletakkan pada *seabed* yang *erodible* (mudah tereorsi), ada kemungkinan terjadi *scouring* disekitar pipa dipengaruhi gelombang atau arus yang kemudian menyebabkan *free span* pada *pipeline*. Ketika terbentuk *free span* terdapat kemungkinan pipa terdefleksi pada lubang *scouring*. Ketika pipa menyentuh dasar dari lubang *scouring* maka akan mempengaruhi proses *scouring*. Proses selanjutnya ini disebut *backfilling* dan kemudian diikuti oleh proses *self-burial* dari *pipeline*.

Untuk mengetahui awal mula terjadinya *scouring* maka berikut proses setiap tahapannya.

### 1. Onset Of Scour

Ketika aliran yang mengenai pipa cukup besar dibandingkan gaya kohesif dari sedimen *seabed* maka akan menyebabkan dasar mengalami pergeseran sedimen, proses mulainya pergeseran ini disebut *onset of scour* ( permulaan *scouring* ). Pada dasarnya *onset of scour* berhubungan dengan *seepage flow* ( aliran rembesan) pada pasir di bagian bawah pipa yang disebabkan perbedaan tekanan antara *upstream* dan *downstream* dari pipa. Ketika kecepatan arus semakin meningkat, titik kritis

dicapai ketika *seepage flow* semakin meningkat lebih cepat dibandingkan perbedaan tekanan dan secara berangsur-angsur permukaan *seabed* pada bagian *downstream* akan naik, dan seketika campuran air dan pasir melalui ruang bagian bawah pipa. Proses ini disebut *piping*, dan pada mekanika tanah biasa disebut kegagalan *piping* pada bagian struktur hidrolik seperti dam, *cofferdam*, dan sebagainya.



**Gambar 2.6** Proses Piping sehingga terjadi *scouring*

Sumber : B.Mutlu Sumer & Jorgen Fredsøe ( 2002 )

## 2. Tunnel Erosion

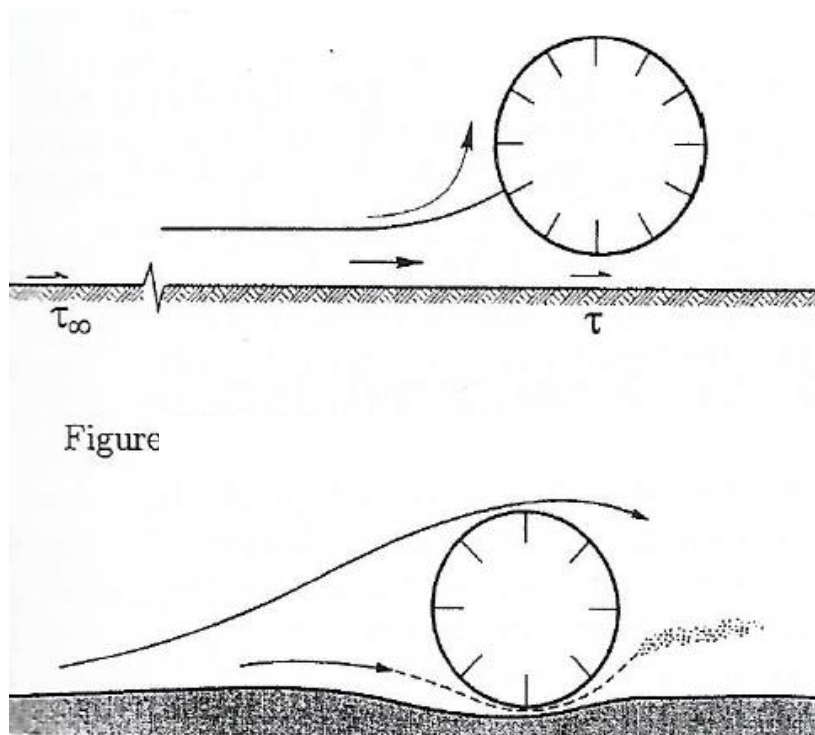
Proses setelah tahap *onset of scour* adalah *tunnel erosion*. Pada tahap ini, gap antara pipa dan dasar masih kecil,  $e \ll D$  dimana  $e$  adalah gap antara pipa & dasar, dan  $D$  adalah diameter pipa. Selama tahap ini, sejumlah besar air terbelokkan pada *gap* ini, sehingga menyebabkan kecepatan pada *gap* sangat besar dan menghasilkan *shear stress* yang sangat besar pada dasar yang terletak dibagian bawah pipa. Menurut perhitungan Sumer *et.al* (1990) mengindikasikan nilai dari *amplification*



factor pada *bed shear stress*, dengan nilai  $e/D = 0.05$ ,  $\alpha = O(4)$ . Nilai dari *amplification factor* dapat dicari dengan memasukkan formulasi seperti berikut :

$$\alpha = \frac{\tau}{\tau_{\infty}} \quad (2.30)$$

Dimana  $\tau$  untuk *bed shear stress*,  $\tau_{\infty}$  untuk *bed shear stress* pada kondisi *undisturbed flow*. Ketika *gap* antara pipa dan dasar semakin besar yang disebabkan oleh *scouring* maka kecepatan aliran menurun, dan selanjutnya diikuti oleh tahap *Lee-wake erosion*.



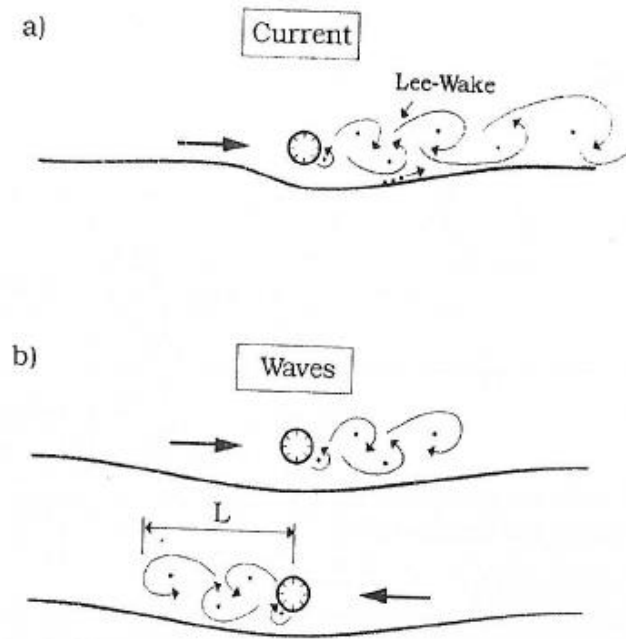
**Gambar 2.7** Proses *piping*

Sumber : B.Mutlu Sumer & Jorgen Fredsøe (2002)

### 3. *Lee-Wake Erosion*

Pada kasus *scouring* dua-dimensi pada bawah pipa, seperti pada gambar dimana pipa diasumsikan *fixed* dengan *gap* nol dan dikenai *steady current*. *Scour* mengalami perubahan seiring waktu. Pada awalnya, *scouring* terjadi begitu cepat dan menghasilkan *dunes* pada *downstream* dan seketika juga menghilang karena

adanya *scouring*. Terlihat pada gambar bahwa *equilibrium profile* akan lebih mengalami *scouring* pada *downstream side* dibandingkan *upstream side* dimana *upstream slope* lebih tajam dan *downstream* lebih landai. Pada dasarnya, *lee-wake erosion* terjadi akibat *vortex shedding*, dan karakteristik dari *scour* ditentukan dari *lee-wake* pada pipa. Ketika *gap* antara pipa dan dasar mencapai nilai tertentu yang nantinya menyebabkan *vortex shedding* terjadi.



**Gambar 2.8** Lee wake effect

Sumber : B.Mutlu Sumer & Jorgen Fredsøe (2002)

Proses akhir dari *scouring* tercapai ketika *bed shear stress* di sepanjang bawah pipa menjadi konstan dan seimbang dengan *undisturb value* disebut sebagai *equilibrium stage*. Sehingga semua sedimen yang masuk pada bagian *scour hole* akan sama jumlahnya dengan sedimen yang keluar dari *scour hole*.

#### 4. Scour Depth

Kedalaman berkembang menuju tahap kesetimbangan melalui *transition period* seperti gambar untuk pipa yang diletakkan pada dasar dengan *gap nol*. Kedalaman yang berkaitan pada tahap *fully-developed* disebut *equilibrium scour depth*.



Nilai  $KC$  yang besar berarti partikel air yang terpengaruh juga semakin jauh dibandingkan total lebar pipa. Nilai  $KC$  adalah sebagai berikut :

$$KC = \frac{U_w T_w}{D} \quad (2.33)$$

$T_w$  merupakan periode gelombang sehingga dapat ditulis menjadi

$$KC = \frac{2\pi a}{D} \quad (2.34)$$

Dimana :

$KC = Keugellan-Carpenter number$

$a =$  amplitudo dari gerakan orbital air di dasar

$U_w =$  kecepatan orbital maksimum di dasar (*undisturbed condition*)

$D =$  diameter pipa

Nilai Shield parameter berubah dengan mengganti  $U_f$  menjadi  $U_{fm}$  yaitu kecepatan friksi maksimum yang memiliki persamaan sebagai berikut :

$$U_{fm} = \sqrt{\frac{f_w}{2}} U_w \quad (2.35)$$

Dengan :

$f_w =$  koefisien gesek gelombang

Kedalaman *scouring* bertambah bersamaan dengan nilai  $KC$ . Sehingga dapat dihubungkan dengan formula sebagai berikut :

$$\frac{s}{D} = 0.1\sqrt{KC} \quad (2.36)$$

c. *Scour depth in irregular waves*

*Sumer dan Fredsøe* (1996) telah melakukan studi eksperimen mengenai pengaruh *irregular wave* terhadap *scouring*. Pengukuran spectrum elevasi air *in-situ* pada *North Sea* dengan kondisi badai telah digunakan spectrum pengontrol (*JONSWAP spectrum*) untuk menghasilkan sinyal pembangkit gelombang.

Nilai  $KC$  yang digunakan adalah sebagai berikut

$$KC = UwTp/D \quad (2.37)$$

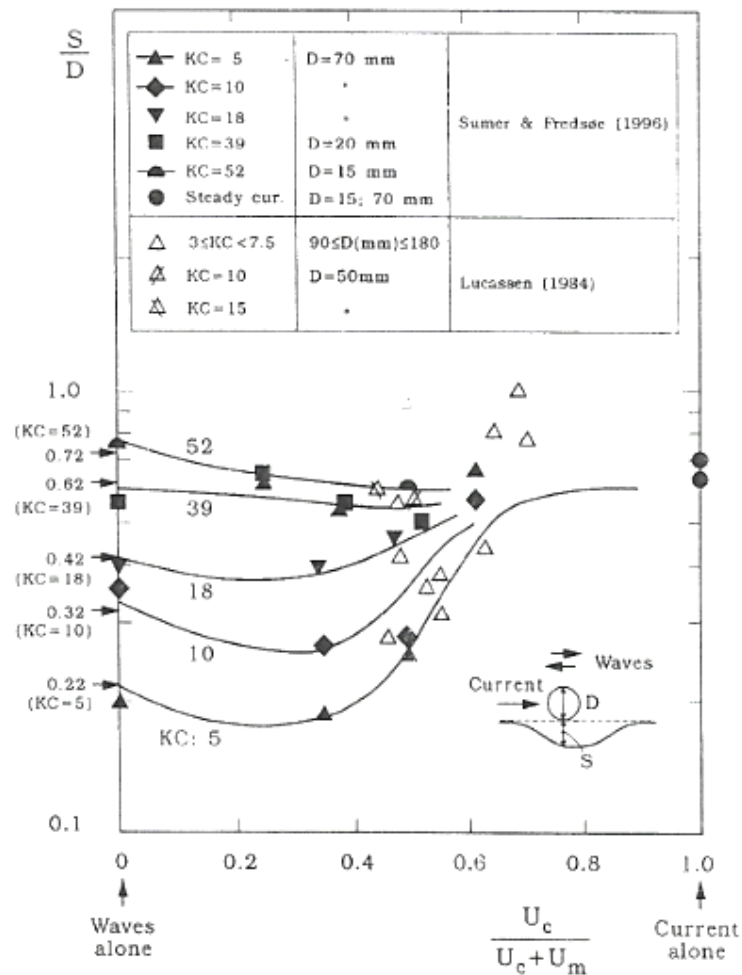
Dimana

$Tp = \text{peak period } (1/f_p)$

$\sigma_U$  adalah standar dari kecepatan orbital pada dasar

d. *Scour depth in combined waves and current*

Pada perhitungan *scouring* dengan kondisi kombinasi arus dan gelombang akan ditentukan oleh parameter non-dimensionalnya yaitu parameter  $U_c/(U_c+U_w)$  serta parameter  $KC$ . Berikut grafik yang menggambarkan karakteristik *scouring* :



Gambar 2.10 Grafik equilibrium scouring kombinasi arus & gelombang

Menurut *Sumer* dan *Fredsøe* (1996) untuk mendapatkan kedalaman *scouring* yang diakibatkan oleh kombinasi arus dan gelombang adalah sebagai berikut :

$$\frac{S}{D} = \frac{S_{cur}}{D} F \quad (2.38)$$

$S_{cur}$  merupakan kedalaman *scouring* yang diakibatkan oleh arus saja.  $F$  adalah fungsi  $KC$  dan  $U_c/(U_c+U_m)$  yang secara lebih jelas dalam persamaan sebagai berikut

1. Untuk kondisi  $0 < U_c/(U_c+U_m) \leq 0.7$

$$F = \frac{5}{3} (KC)^\alpha \exp(2.3b) \quad (2.39)$$

2. Untuk kondisi  $0.7 < U_c/(U_c+U_m) \leq 1$

$$F = 1 \quad (2.40)$$

Koefisien dari nilai  $a$  dan  $b$  dapat ditentukan dari formula berikut

1. Untuk  $0 < U_c/(U_c+U_m) \leq 0.4$

$$a = 0.557 - 0.912 \left( \frac{U_c}{U_c+U_m} - 0.25 \right)^2 \quad (2.41)$$

$$b = -1.14 + 2.24 \left( \frac{U_c}{U_c+U_m} - 0.25 \right)^2 \quad (2.42)$$

2.  $0.4 < U_c/(U_c+U_m) \leq 0.7$

$$a = -2.14 \left( \frac{U_c}{U_c+U_m} \right) + 1.46 \quad (2.43)$$

$$b = 3.3 \left( \frac{U_c}{U_c+U_m} \right) - 2.5 \quad (2.44)$$

e. *Sour depth in shoaling condition* (Pendangkalan)

Pada kondisi *shoaling* terjadi gelombang pecah dan ini menyebabkan aliran kuat yang dapat mengikis dasar. Terdapat tiga jenis gelombang pecah yaitu *spilling*

*breaker, plunging break, & surging breaker*. Pengaruh dari gelombang menjadi factor penting dalam *scouring*. Kedalaman *scouring* pada kasus *shoaling* pada kondisi gelombang yang sama. Berikut formula kedalaman *scouring* pada kondisi *shoaling*

$$\frac{S}{D} = 0.11KC^{0.45} \quad (2.45)$$

##### 5. Lebar *Scouring*

Lebar *scouring* semakin bertambah dengan bertambahnya nilai *KC*. Formula pendekatan empiris untuk hubungan keduanya adalah sebagai berikut

$$\frac{W}{D} = 0.35KC^{0.65} \quad (2.46)$$

W adalah lebar dari *scourin*

##### 6. Skala Waktu penggerusan

Saat proses dari pembentukan *scour depth* sampai menuju kesetimbangan membutuhkan periode tertentu atau yang biasa disebut sebagai *transitional period*. Formula yang dapat digunakan untuk menghitung skala waktu adalah sebagai berikut

$$S_t = S \left( 1 - \exp \left( -\frac{t}{T} \right) \right) \quad (2.47)$$

Dimana

$S_t$  = kesetimbangan kedalaman *scouring*

$T$  = prediksi waktu dari *scour depth* dan waktu yang berlangsung, biasanya dihitung dengan garis miring yang ditarik dari  $t=0$  seperti gambar

##### a. Skala waktu pada kondisi *steady currents*

Formula yang digunakan pada kondisi ini adalah sebagai berikut

$$T^* = f(\theta) \quad (2.48)$$

$$T^* = \frac{(g(s-1)d^3)^{1/2}}{D^2} T \quad (2.49)$$

Ketika nilai dari *Shield parameter* semakin besar maka skala waktu akan semakin kecil.

b. Skala waktu pada kondisi gelombang

*Fredsøe et.al (1992)* memberikan formula empiris dalam menghitung *time scale*

$$T^* = \frac{1}{50} \theta^{-5/3} \quad (2.50)$$

Dimana untuk mencari nilai  $\theta$  dengan kombinasi arus dan gelombang yang ditampilkan pada publikasi Cheng et.al adalah sebagai berikut :

$$\theta = \frac{1}{50} \left( (1 - m)\theta_w + (\theta_c \times m) \right)^{-5/3} \quad (2.50)$$

Dimana untuk nilai  $m$  adalah parameter non dimensional  $U_c/(U_c+U_w)$

## 7. Propagasi *Scouring* Sepanjang Pipa

Untuk korelasi antara *scouring* dan *free span* maka berikut adalah beberapa formulasi yang digunakan.

a. Laju penyebaran *scouring* sepanjang pipa

Dalam pemodelan dua dimensi, bagian yang mengalami *scouring* adalah bagian tengah hingga mencapai kesetimbangan sehingga nilai dari *bed shear stress* adalah sama dengan *undisturb value*  $\tau_{00}$ . Namun *bed shear stress* akan bertambah nilainya ketika bergerak pada ujung dari *span* yang terjadi sepanjang  $\beta D$  yang ditunjukkan pada gambar.

Erosi yang terjadi pada bagian sudut *span* ditentukan berdasarkan perbedaan antara transport sedimen yang keluar dari sudut dengan transport sedimen yang masuk pada area sudut.

Dengan menggunakan persamaan Meyer-Peter dan Muller (1948) suatu persamaan *bed-load transport* didapatkan sebagai berikut :



$$qb = 8\sqrt{(s-1)gd_{50}}(\theta - 0.047)^{3/2} \quad (2.53)$$

Dimana :  $n$  = porositas

$\beta$  = konstanta

$D$  = diameter pipa

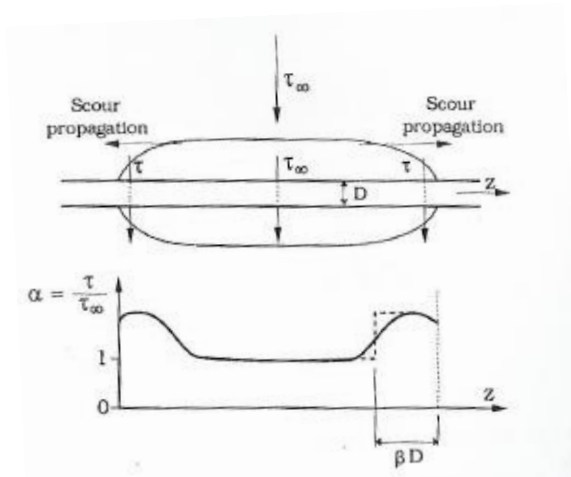
$q_{c0}$  = laju transport sedimen pada bagian sudut

$q_0$  = laju transport sedimen pada bagian *flat seabed*

$d_{50}$  = ukuran sedimen

Lalu selanjutnya untuk menghitung laju erosi longitudinal pada bahu dari *free span* dapat ditentukan dengan menggunakan formula sebagai berikut :

$$C = \frac{1}{eD} \frac{d(Vol)}{dt} \quad (2.54)$$



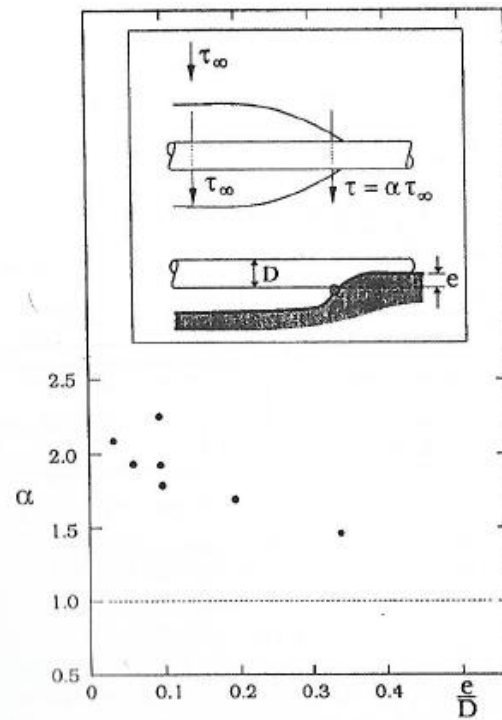
**Gambar 2.11** Propagasi *scouring* sepanjang pipa

Sumber : B.Mutlu Sumer & Jorgen Fredsøe (2002)

Laju erosi longitudinal ditentukan berdasarkan properti sedimen, *bed-shear stress* pada *seabed*, *embedment* pipa, dan dua koefisien  $\alpha$  &  $\beta$ . Namun dengan asumsi nilai dari  $\beta = 1$  maka laju volume erosi yang terjadi dapat ditentukan dengan menggunakan formula sebagai berikut :

$$C = \frac{q_{c0} - q_0}{e(1-n)} \quad (2.55)$$

Nilai dari  $\alpha$  didapatkan dari eksperimen yang ditunjukkan pada gambar berikut.



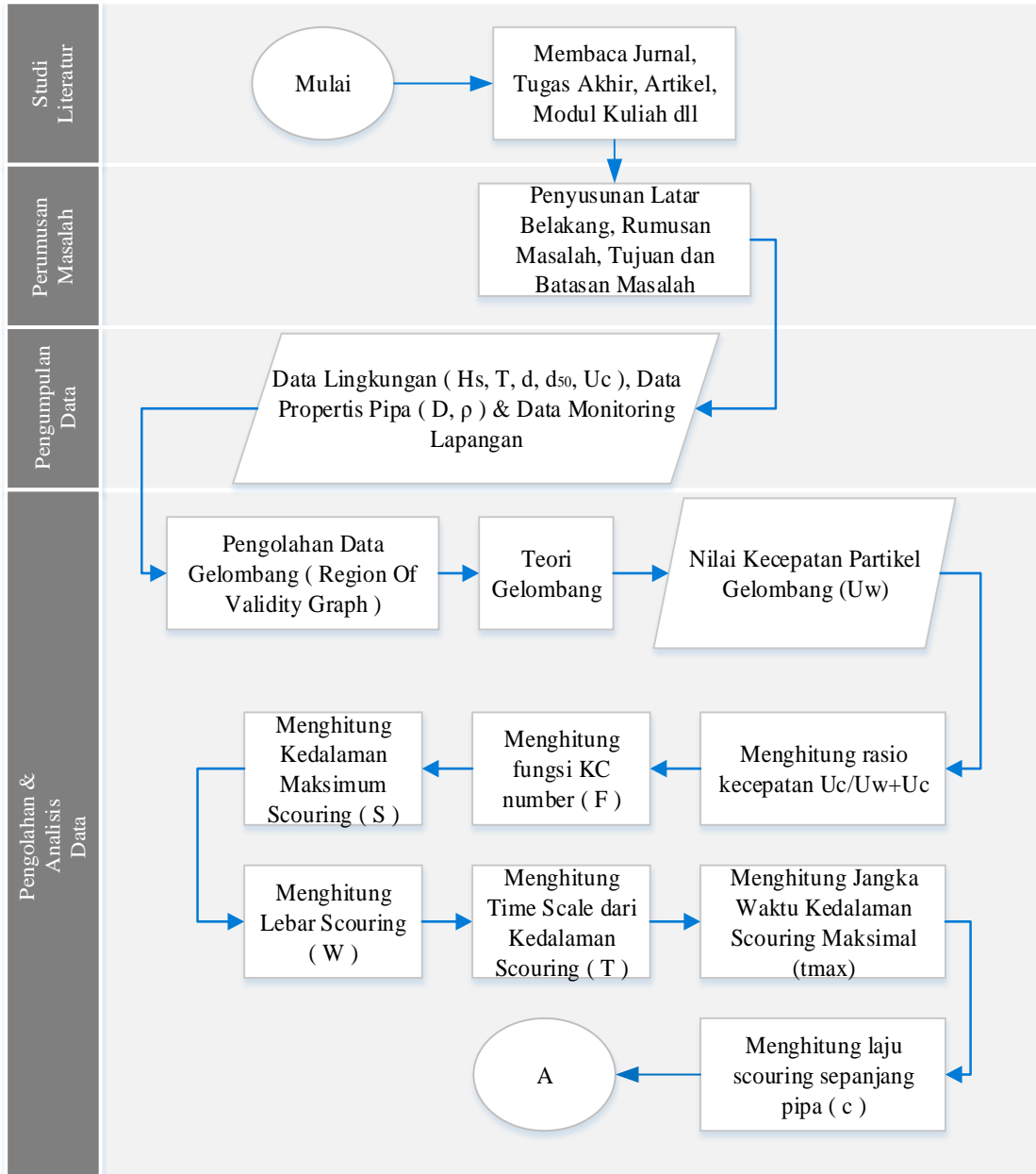
**Gambar 2.12** Amplification Factor pada bed shear stress

Sumber : Hansen (1991) dalam B.Mutlu Sumer & Jorgen Fredsøe (2002)

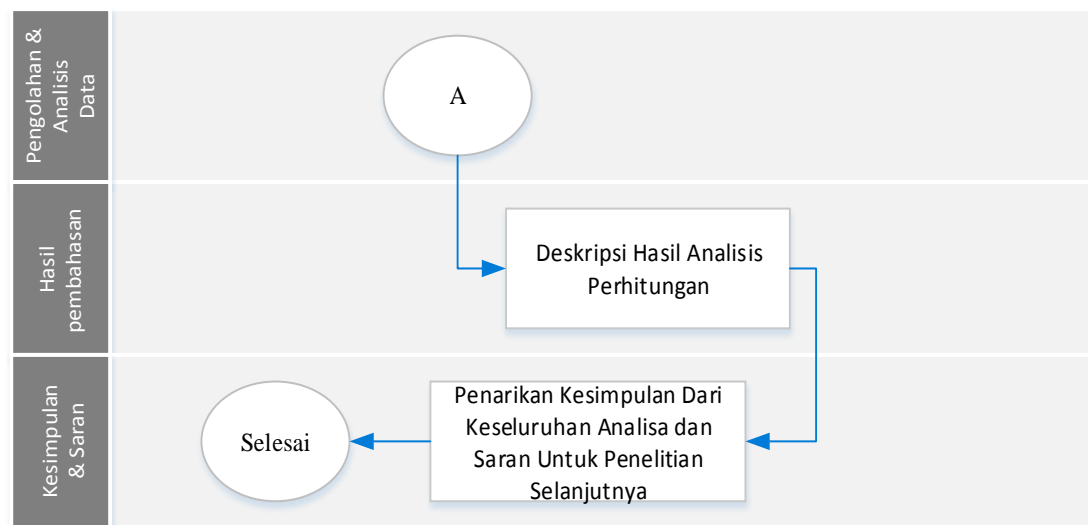
## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Diagram Metodologi



**Gambar 3.1.a** Diagram Alur Tahapan Pengerjaan



**Gambar 3.1.b** Diagram Alur Tahapan Pengerjaan

### 3.2 Deskripsi Alur

Tahapan dalam penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

#### 1. Studi Literatur

Dalam tahap studi literatur penulis mengkaji teori mengenai *scouring process* pada pipa bawah laut. Penulis mendapat literatur berupa jurnal, buku, *website*, materi kuliah maupun laporan tugas akhir yang memiliki tema yang serupa. Dari literatur ini didapatkan pengetahuan dasar untuk dijadikan topik penulisan tugas akhir dan dasar pengerjaan.

#### 2. Perumusan Masalah

Setelah mendapatkan literatur maka penulis selanjutnya melakukan proses perumusan masalah. Dalam perumusan masalah tentu akan didapatkan intisari penelitian sehingga selama penulisan dan pengerjaan tugas akhir sesuai dengan apa yang diharapkan.

#### 3. Pengumpulan Data

Setelah mendapatkan acuan yang akan dibahas maka selanjutnya dilakukan pengumpulan data yang dibutuhkan dalam pengerjaan laporan tugas akhir. Data dari laporan tugas akhir merupakan data pipa gas transmisi SSWJ ( *South Sumatra-West Java*) *gas pipeline project phase II* Labuhan Maringgai – Muara Bekasi *Offshore Pipeline* milik PGN.

Data yang didapatkan berupa :

- Data propertis pipa ( diameter, panjang, & *Kilometer point* letak pipa)
- Data lingkungan ( kedalaman perairan, kecepatan arus, tinggi gelombang dan periode gelombang).

#### 4. Pengolahan Data

Pada tahap ini, data yang didapatkan diolah untuk memperoleh variabel yang dibutuhkan dalam perhitungan analisis *scouring* dan pembentukan *free span* pada pipa gas bawah laut. Data awal yang perlu diolah adalah data gelombang untuk memastikan teori gelombang yang digunakan dan menentukan data arus.

## 5. Analisa Data

Pada tahap analisis maka setiap variabel yang sudah didapatkan dihitung dan dilakukan pengamatan pada setiap perhitungan. Dalam tahap ini penulis harus memastikan setiap perhitungan sudah tepat. Analisa yang dilakukan adalah meliputi:

- a. Perhitungan kedalaman *scouring* maksimal.
- b. Perhitungan lebar *scouring*.
- c. Perhitungan jangka waktu kedalaman *scouring* maksimal.
- d. Perhitungan laju propagasi *scouring* sepanjang pipa.

Dari setiap hasil yang didapatkan maka selanjutnya penulis memberikan pembahasan dari masing-masing tahap dan menjelaskan secara jelas fenomena yang terjadi.

## 6. Kesimpulan dan Saran

Pada tahap ini penulis memberikan ringkasan setiap inti dari hasil perhitungan dan memberikan masukan untuk peneliti yang ingin melakukan penelitian serupa.

## BAB IV

### ANALISIS DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Analisis Data Lingkungan

Data dalam pengerjaan tugas akhir ini berasal dari Perusahaan Gas Negara (PGN) yang memiliki wewenang dalam perancangan maupun instalasi pipa dalam kebutuhan transmisi maupun distribusi energi berupa gas. Data yang digunakan berlokasi di Selat Sunda dengan rentang sepanjang  $\pm 160$  km dari Labuhan Maringgai (Sumatera Selatan) hingga sampai di Muara Bekasi (Jawa Barat). Pipa gas bawah laut disebut pipa gas SSWJ (South Sumatera-West Java) memiliki diameter pipa sebesar 32 inch. Berikut merupakan data dari jarak kilometer point (KP) & kedalaman di setiap zona yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.1.

**Tabel 4.1** Kilometer point zona yang digunakan

Zones	KP from	KP to	min depth (m)	max depth (m)
1	0	10	0.00	8.50
2	10	29	9.00	26.50
3	29	48	22.50	50.50
17	139.6	155.7	5.80	21.80
18	155.7	161.3	0.00	5.80

Pada tabel 4.2 adalah merupakan data jenis tanah yang berada pada zona 1, zona 2, zona 3, & zona 17 - 18. Pada zona tersebut berada pada kondisi in-trench.

**Tabel 4.2** Jenis Tanah Setiap Zona Pada Kondisi In-trench

KP Range		Soil Type	Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	Zone
From	To			
0	10	Sand	1320	1
10	15.5	Sand	1461	2
29.6	39.6	Sand	1527	3
149.6	161.3	Sand	1258	17-18

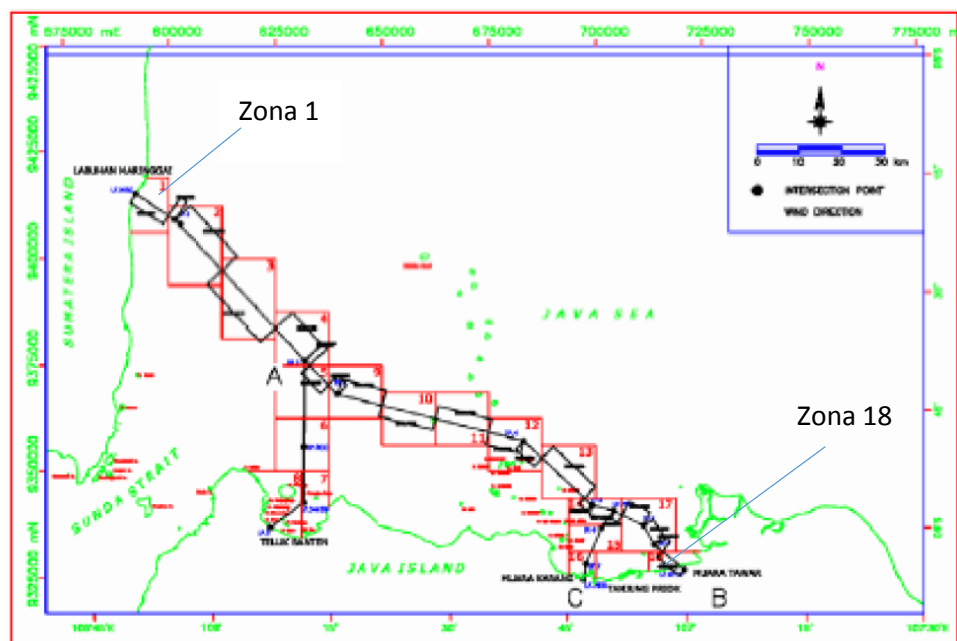
**Tabel 4.3** Data Gelombang dan Arus

Zone	Z1	Z2	Z3	Z17	Z18
<b>Wave</b>					
Hs (m)	4.10	4.13	4.49	3.80	3.46
Ts (sec)	8.18	8.21	8.55	7.88	7.52
<b>Current</b>					
0% of depth	1.72	1.36	1.70	1.28	1.42
50% of depth	1.13	0.76	0.85	0.69	0.83
100% of depth	0.87	0.50	0.37	0.38	0.52

Pada tabel 4.3 adalah merupakan data gelombang dan arus yang berada pada zona 1, zona 2, zona 3, & zona 17 - 18. Data arus yang digunakan adalah pada 100% kedalaman dan untuk gelombang perlu dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai kecepatan dasar gelombang.

#### 4.1.1 Gelombang pecah

Pada zona 1 dan 18 merupakan zona yang mengalami pendangkalan seperti dapat dilihat pada gambar 4.1.



**Gambar 4.1** Layout pipa gas bawah laut SSWJ PGN

Untuk mengetahui gelombang pecah pada zona 1 & 18 maka dilakukan perhitungan sebagaimana yang diberikan pada buku *Shore Protection Manual*.



a. Perhitungan gelombang di zona 1

$$d = 8.4 \text{ m}$$

$$H_s = 4.1 \text{ m}$$

$$T_s = 8.18 \text{ m}$$

$$L_o = 104.42 \text{ m}$$

$$d/L_o = 0.0804$$

maka ketika dimasukkan pada tabel C-1 pada buku *Shore protection manual* didapatkan nilai sebagai berikut

$$d/L = 0.124$$

$$L = 68.284 \text{ m}$$

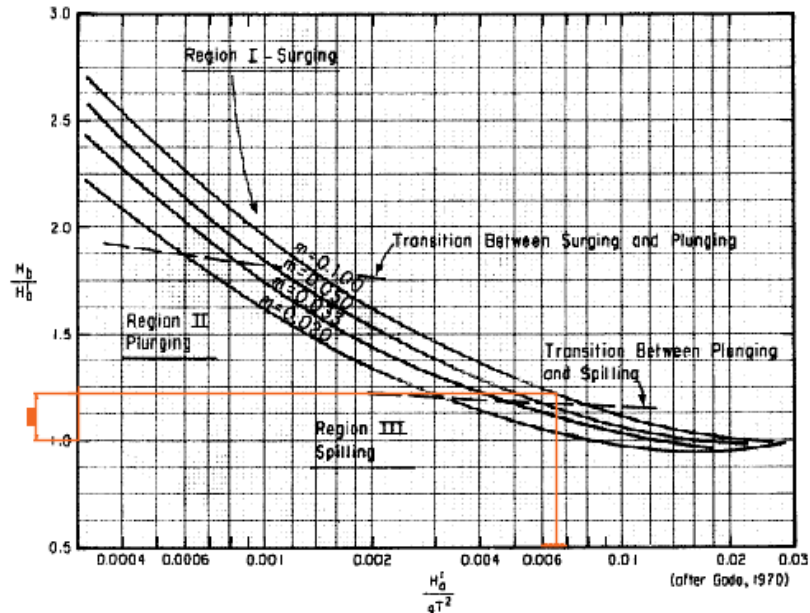
$$H/H'_o = 0.95$$

$$H'_o = 4.30 \text{ m}$$

$$m = 0.1$$

$$H'_o/gT^2 = 0.0066$$

Nilai dari  $H'_o/gT^2$  dimasukkan pada grafik dibawah ini sehingga didapat nilai dari  $H_b$ .



**Gambar 4.2** Grafik indeks gelombang pecah

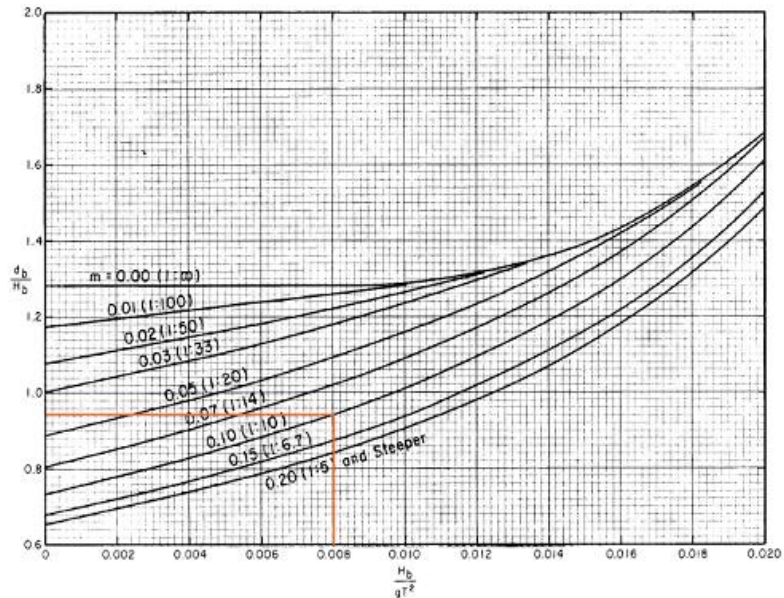
Maka nilai yang didapatkan adalah sebagai berikut

$$H_b/H'_o = 1.22$$

$$H_b = 5.25 \text{ m}$$

$$H_b / gT^2 = 0.008$$

Nilai dari  $H_b / gT^2$  dimasukkan pada grafik dibawah ini sehingga didapatkan nilai dari  $d_b$



**Gambar 4.3** Grafik index kedalaman gelombang pecah

Maka nilai yang didapatkan adalah sebagai berikut

$$d_b/H_b = 0.94$$

$$d_b = 4.93 \text{ m}$$

Dari hasil perhitungan diketahui bahwa gelombang pecah pada zona 1 terjadi pada kedalaman 4.93 m dengan tinggi gelombang pecah setinggi 5.25 m

**b. Perhitungan gelombang pecah di zona 18**

$$d = 15.3 \text{ m}$$

$$H_s = 3.46 \text{ m}$$

$$T_s = 7.52 \text{ m}$$

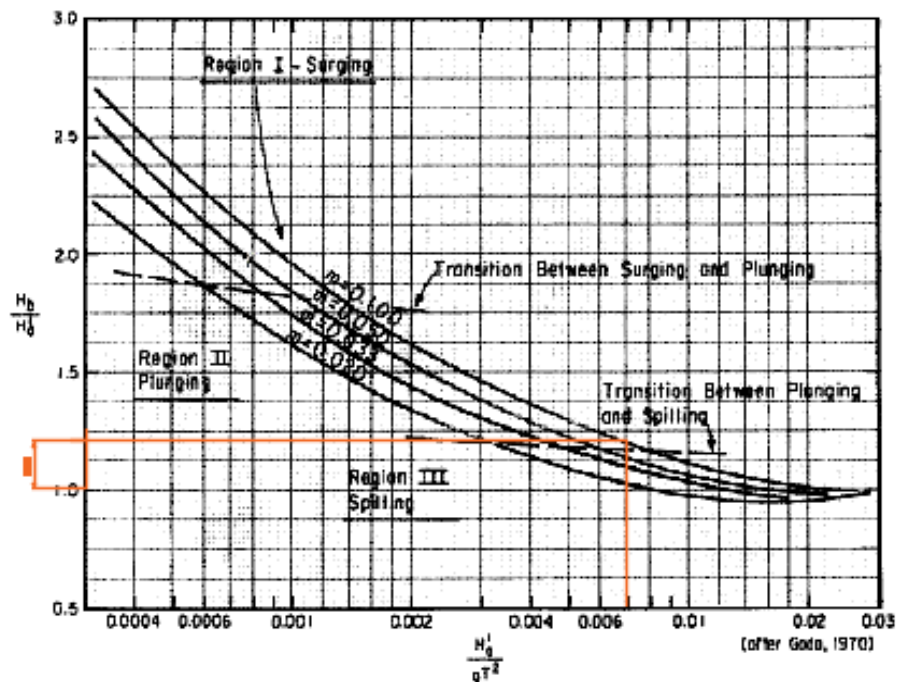
$$L_o = 88.25 \text{ m}$$

$$d/L_o = 0.173$$

maka ketika dimasukkan pada 39able C-1 pada buku *Shore protection manual* didapatkan nilai sebagai berikut

$$\begin{aligned} d/L &= 0.203 \\ L &= 75.282 \quad \text{m} \\ H/H_o &= 0.914 \\ H_o &= 3.786 \quad \text{m} \\ m &= 0.1 \\ H_o/gT^2 &= 0.007 \end{aligned}$$

Nilai dari  $H_o/gT^2$  dimasukkan pada grafik dibawah ini sehingga didapat nilai dari  $H_b$

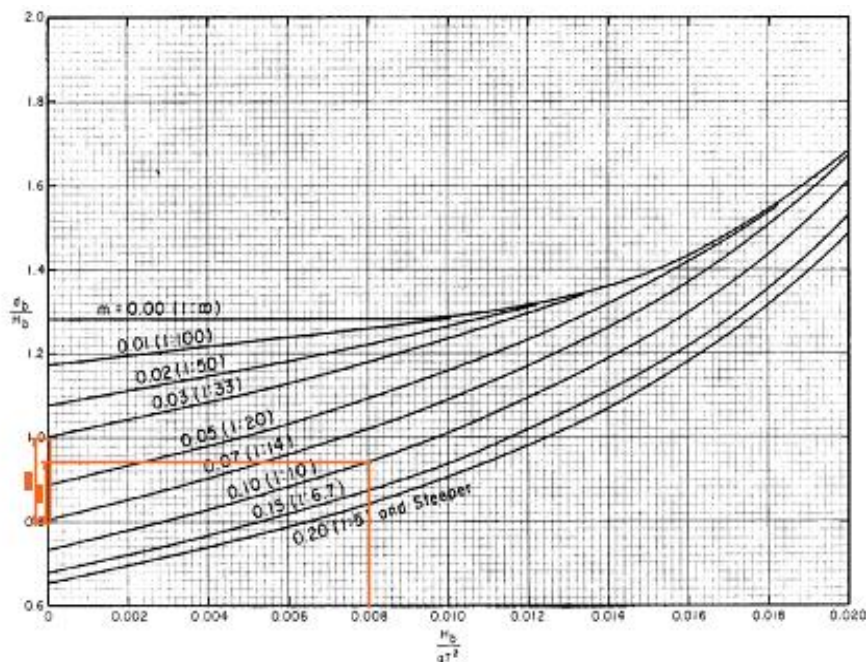


**Gambar 4.4** Grafik indeks gelombang pecah

Maka nilai yang didapatkan adalah sebagai berikut

$$\begin{aligned} H_b/H_o &= 1.19 \\ H_b &= 4.50 \quad \text{m} \\ H_b/gT^2 &= 0.008 \end{aligned}$$

Nilai dari  $H_b / gT^2$  dimasukkan pada grafik dibawah ini sehingga didapatkan nilai dari  $d_b$



**Gambar 4.5** Grafik index kedalaman gelombang pecah

Maka nilai yang didapatkan adalah sebagai berikut

$$d_b/H_b = 0.92$$

$$d_b = 4.14 \text{ m}$$

Dari hasil perhitungan diketahui bahwa gelombang pecah pada zona 18 terjadi pada kedalaman 4.14 m dengan tinggi gelombang pecah setinggi 4.50 m.

#### 4.1.2 Menentukan Teori Gelombang

Untuk memasukkan properti gelombang kedalam perhitungan maka terlebih dahulu ditentukan teori gelombang yang memenuhi berdasarkan pada nilai  $H/gT^2$  dan  $d/gT^2$  di dalam grafik *Region of Validity* dan dapat ditentukan teori yang digunakan dalam menghasilkan properti gelombang yang diinginkan. Ketika proses ini dilakukan maka didapatkan hasil bahwa zona 1, 2, 17 & 18 menggunakan teori gelombang Stokes orde III sementara untuk zona 3 menggunakan teori gelombang Stokes orde II.

#### 4.1.3 Hasil Perhitungan Kecepatan Dasar Partikel Gelombang

Setelah didapatkan hasil properti gelombang yang diperlukan seperti panjang gelombang (  $L$  ) dan cepat rambat gelombang (  $C$  ) maka kemudian ditentukan nilai

dari kecepatan partikel dasar gelombang ( $U_w$ ). Kecepatan partikel dasar gelombang digunakan dalam menghitung properti *scouring*.

**a. Zona 1**

Berikut merupakan hasil perhitungan kecepatan partikel gelombang pada dasar menggunakan teori gelombang stokes orde III.

**Tabel 4.4** Panjang dan Kecepatan Orbital Gelombang Pada Zona 1

No	d (m)	Hs (m)	Ts (s)	Lo (m)	L (m)	C (m/s)	Uw dasar (m/s)
1	6.00	4.1	8.18	104.429	58.928	7.21	0.33
2	6.48	4.1	8.18	104.429	60.926	7.45	0.54
3	6.96	4.1	8.18	104.429	62.867	7.68	0.69
4	7.44	4.1	8.18	104.429	64.657	7.90	0.80
5	7.92	4.1	8.18	104.429	66.357	8.11	0.89
6	8.40	4.1	8.18	104.429	67.975	8.31	0.95

Kecepatan partikel pada zona 1 mengalami penurunan kecepatan dari kedalaman 8.40 m ke kedalaman 6.00 m *Airy* menyebutkan hal ini disebabkan pengaruh kedalaman yang semakin kecil yang secara signifikan dalam pengurangan kecepatan partikel gelombang.

**b. Zona 2**

Berikut merupakan hasil perhitungan kecepatan partikel gelombang pada dasar menggunakan teori gelombang stokes orde III.

**Tabel 4.5** Panjang dan Kecepatan Orbital Gelombang Pada Zona 2

No	d (m)	Hs (m)	Ts (s)	Lo (m)	L (m)	C (m/s)	Uw dasar (m/s)
1	10.00	4.13	8.21	105.196	73.15	8.91	1.01
2	11.10	4.13	8.21	105.196	76.16	9.27	1.03
3	12.20	4.13	8.21	105.196	78.85	9.61	1.02
4	13.30	4.13	8.21	105.196	81.33	9.90	0.99
5	14.40	4.13	8.21	105.196	83.55	10.18	0.96
6	15.50	4.13	8.21	105.196	85.61	10.42	0.92

Kecepatan partikel pada zona 2 mengalami kenaikan kecepatan dari kedalaman 15.50 m ke kedalaman 10.00 m *Airy* menyebutkan hal ini disebabkan pengaruh kedalaman masih tidak signifikan dalam mempengaruhi *elliptical path* gelombang sehingga kecepatan partikel gelombang masih mengalami peningkatan.

**c. Zona 3**

Berikut merupakan hasil perhitungan kecepatan partikel gelombang pada dasar menggunakan teori gelombang stokes orde II.

**Tabel 4.6** Panjang dan Kecepatan Orbital Gelombang Pada Zona 3

No	d (m)	Hs (m)	Ts (s)	Lo (m)	L (m)	C (m/s)	Uw dasar (m/s)
1	29.00	4.49	8.55	114.089	106.800	12.49	0.62
2	32.80	4.49	8.55	114.089	109.002	12.75	0.51
3	36.60	4.49	8.55	114.089	110.581	12.93	0.42
4	40.40	4.49	8.55	114.089	111.693	13.06	0.34
5	44.20	4.49	8.55	114.089	112.471	13.15	0.28
6	48.00	4.49	8.55	114.089	113.004	13.22	0.23

Kecepatan partikel pada zona 3 mengalami kenaikan kecepatan dari kedalaman 48.00 m ke kedalaman 29.00 m *Airy* menyebutkan hal ini disebabkan pengaruh kedalaman masih tidak signifikan dalam mempengaruhi *elliptical path* gelombang sehingga kecepatan partikel gelombang masih mengalami peningkatan.

**d. Zona 17&18**

Berikut merupakan hasil perhitungan kecepatan partikel gelombang pada dasar menggunakan teori gelombang stokes orde III.

**Tabel 4.7** Panjang dan Kecepatan Orbital Gelombang Pada Zona 17&18

No	d (m)	Hs (m)	Ts (s)	Lo (m)	L (m)	C (m/s)	Uw dasar (m/s)
1	7.00	3.46	7.52	88.257	57.112	7.59	0.86
2	8.66	3.46	7.52	88.257	62.156	8.26	0.95
3	10.32	3.46	7.52	88.257	66.369	8.82	0.93
4	11.98	3.46	7.52	88.257	69.916	9.29	0.88
5	13.64	3.46	7.52	88.257	72.920	9.69	0.81
6	15.30	3.46	7.52	88.257	75.282	10.04	0.74

Kecepatan partikel pada zona 3 mengalami kenaikan kecepatan dari kedalaman 15.30 m ke kedalaman 8.66 m *Airy* menyebutkan hal ini disebabkan pengaruh kedalaman masih tidak signifikan dalam mempengaruhi *elliptical path* gelombang sehingga kecepatan partikel gelombang masih mengalami peningkatan dan ketika di kedalaman 7.00 m pengaruh kedalaman sudah mulai mempengaruhi kecepatan partikel gelombang sehingga terjadi penurunan kecepatan partikel gelombang.

#### 4.2 Hasil Perhitungan Kedalaman Maksimum *Scouring*

Dalam proses perhitungan kedalaman *scouring* ( $S$ ) maksimum terdapat hal yang perlu diperhatikan sebelumnya yaitu menentukan pengaruh yang mengakibatkan *scouring*. Dalam analisis *scouring* kali ini, pengaruh disebabkan oleh kombinasi kecepatan arus dan gelombang sehingga perlu menggunakan formula yang representatif dengan kondisi tersebut. . Nilai kecepatan partikel dasar gelombang ( $U_w$ ) yang didapatkan dari perhitungan sebelumnya dimasukkan dalam rumus untuk mendapatkan faktor non-dimensional yaitu  $U_c/(U_c+U_w)$  dan  $KC$ . Hasil dari perhitungan faktor non-dimensional kemudian dimasukkan didalam formula perhitungan kedalaman *scouring*.

Hasil perhitungan pada masing-masing zona disajikan dengan tiga variasi ukuran diameter pipa dengan ukuran 30 inchi (0.762 m) , 32 inchi (0.813 m) dan 34 inchi (0.864 m) dan juga terdapat tiga variasi ukuran kedalaman embedment ( $e$ ) yang masing-masing adalah dengan ukuran 5% dari diameter pipa ( $e = -0.05D$ ), 15% dari diameter pipa ( $e = -0.15D$ ) dan 25% dari diameter pipa ( $e = -0.25D$ ). Nilai negatif menunjukkan bahwa  $e$  berada dibawah *seabed* atau dengan kata lain pipa pada kondisi tertanam sebagian (*in-trench*). Nilai variasi  $e = -0.05D$  sampai dengan  $e = -0.25D$  diambil mengikuti hasil penelitian yang dilakukan oleh *Sumer* dan *Fredsoe* (1996), sehingga kondisi embedment ( $e$ ) yang melebihi nilai  $e = -0.25D$  belum bisa divalidasi karena belum ada publikasi yang tersedia. Pada tabel yang disajikan di masing-masing zona dicantumkan informasi mengenai kedalaman perairan ( $d$ ), kecepatan partikel dasar gelombang ( $U_w$ ), faktor non-dimensional  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  &  $KC$  (Keulegan-Carpenter) , kedalaman *scouring* maksimum ( $S_{Max}$ ), serta perbandingan kedalaman *scouring* maksimum dengan diameter pipa.

Secara umum berdasarkan penelitian baik yang dilakukan Sumer, Fredsoe, Mao, dan peneliti lain mengenai *scouring* pada pipa baik disebabkan arus, gelombang atau kombinasi arus gelombang menunjukkan bahwa ketika nilai diameter pipa semakin besar maka nilai kedalaman *scouring* yang terjadi juga akan semakin besar. Sementara untuk nilai *embedment* ( $e$ ) secara umum juga serupa yaitu ketika nilai  $e$  semakin besar maka *scouring* juga semakin besar. Dalam analisis kali ini, kedalaman *scouring* akan semakin besar dari ukuran 30 inci sampai ke ukuran 34 inci dan kedalaman *scouring* akan semakin besar pula ketika nilai  $e$  dari  $e = -0.05D$ , hingga  $e = -0.25D$ .

Pada hasil penelitian Sumer dan Fredsoe (1996) nilai kedalaman *scouring* yang dipengaruhi kombinasi arus dan gelombang mengalami penurunan ketika nilai  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  membesar dan termasuk pada rentang nilai 0 – 0.4, hal ini dikarenakan pengaruh gelombang dominan yang nilainya juga semakin menurun. Ketika nilai  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  berada pada rentang 0.4 – 0.7 maka kecepatan arus dan gelombang yang mulai saling menguatkan menyebabkan peningkatan nilai kedalaman *scouring* yang drastis. Sementara nilai  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  berada pada rentang 0.7 – 1 dalam kondisi tetap (*steady*) karena efek lee wake yang sudah hilang sehingga mempengaruhi proses *scouring*. Sementara untuk faktor KC secara umum menurut Sumer dan Fredsoe semakin besar nilai KC maka nilai kedalaman *scouring* mengalami peningkatan. Namun perlu diingat bahwa  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  dan KC saling berkaitan erat sehingga validasi terhadap grafik yang diberikan Sumer dan Fredsoe sangat perlu untuk menilai apakah perhitungan dan analisis sudah benar. Berikut merupakan hasil perhitungan untuk mendapatkan nilai kedalaman *scouring* maksimum pada masing-masing zona.

#### a. Zona 1

Berikut merupakan hasil perhitungan dari kedalaman *scouring* pada zona 1

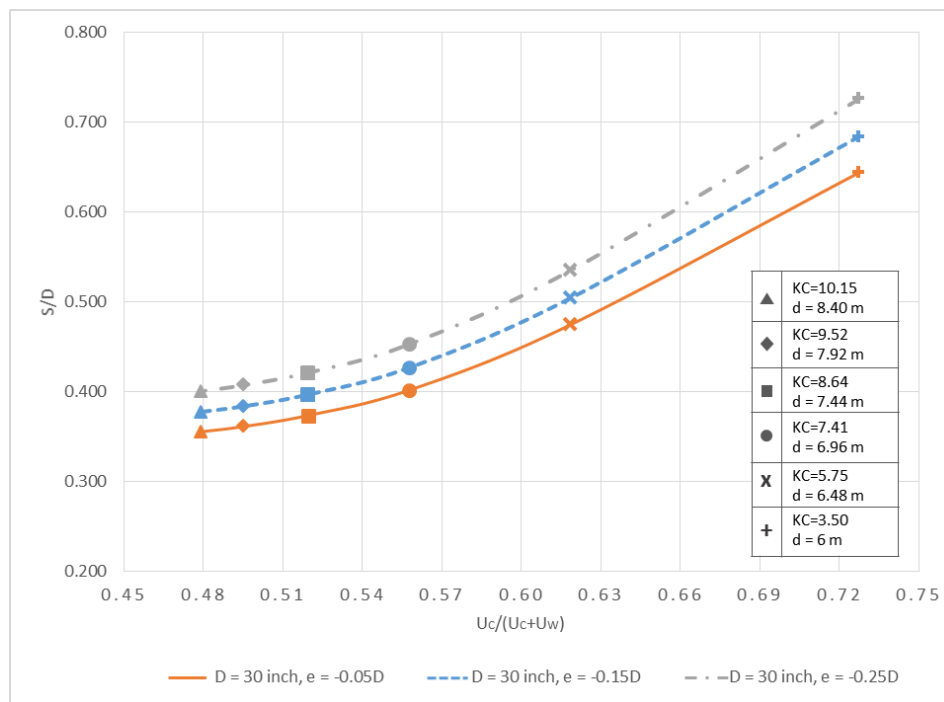
**Tabel 4.8** *Scouring* maksimum Zona 1 dengan  $D = 30$  inci ( 0.762 m )

No	d (m)	U <sub>w</sub> dasar (m/s)	U <sub>c</sub> (m/s)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	KC	e=-0.05D		e=-0.15D		e=-0.25D	
						S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D
1	6.00	0.33	0.87	0.73	3.50	0.491	0.644	0.521	0.684	0.553	0.726



**Tabel 4.8** (Lanjutan)

No	d (m)	Uw dasar (m/s)	Uc (m/s)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	KC	e=-0.05D		e=-0.15D		e=-0.25D	
						S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D
2	6.48	0.54	0.87	0.62	5.75	0.362	0.475	0.384	0.504	0.408	0.535
3	6.96	0.69	0.87	0.56	7.41	0.306	0.402	0.325	0.426	0.345	0.453
4	7.44	0.80	0.87	0.52	8.64	0.285	0.373	0.302	0.396	0.321	0.421
5	7.92	0.89	0.87	0.50	9.52	0.275	0.361	0.292	0.383	0.310	0.407
6	8.40	0.95	0.87	0.48	10.15	0.271	0.355	0.287	0.377	0.305	0.400



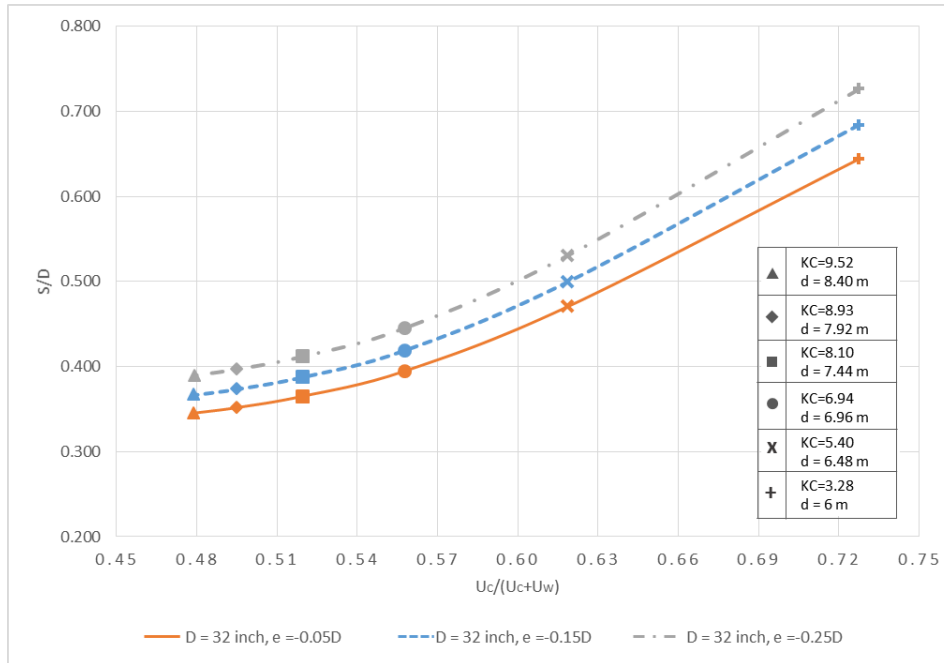
**Gambar 4.6** Grafik kedalaman scouring maksimum di zona 1 dengan  $D = 30$  inch.

**Tabel 4.9** Scouring maksimum Zona 1 dengan  $D = 32$  inchi ( 0.813 m )

No	d (m)	Uw dasar (m/s)	Uc (m/s)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	KC	e=-0.05D		e=-0.15D		e=-0.25D	
						S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D
1	6.00	0.33	0.87	0.73	3.28	0.523	0.644	0.556	0.684	0.590	0.726
2	6.48	0.54	0.87	0.62	5.40	0.382	0.471	0.406	0.500	0.431	0.531
3	6.96	0.69	0.87	0.56	6.94	0.321	0.395	0.341	0.491	0.362	0.445
4	7.44	0.80	0.87	0.52	8.10	0.297	0.365	0.315	0.388	0.335	0.412

**Tabel 4.9** (Lanjutan)

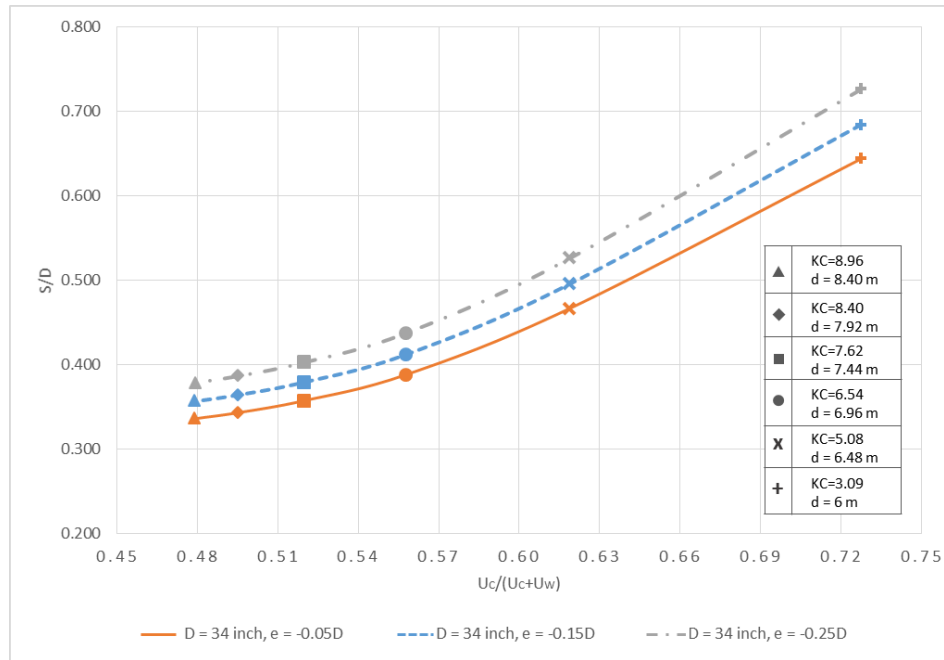
No	d (m)	Uw dasar (m/s)	Uc (m/s)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	KC	e=-0.05D		e=-0.15D		e=-0.25D	
						S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D
5	7.92	0.89	0.87	0.50	8.93	0.286	0.352	0.304	0.374	0.322	0.397
6	8.40	0.95	0.87	0.48	9.52	0.281	0.345	0.298	0.367	0.316	0.389



**Gambar 4.7** Grafik kedalaman scouring maksimum di zona 1 dengan D = 32 inch

**Tabel 4.10** Scouring maksimum Zona 1 dengan D = 34 inch 34 inchi ( 0.864 m )

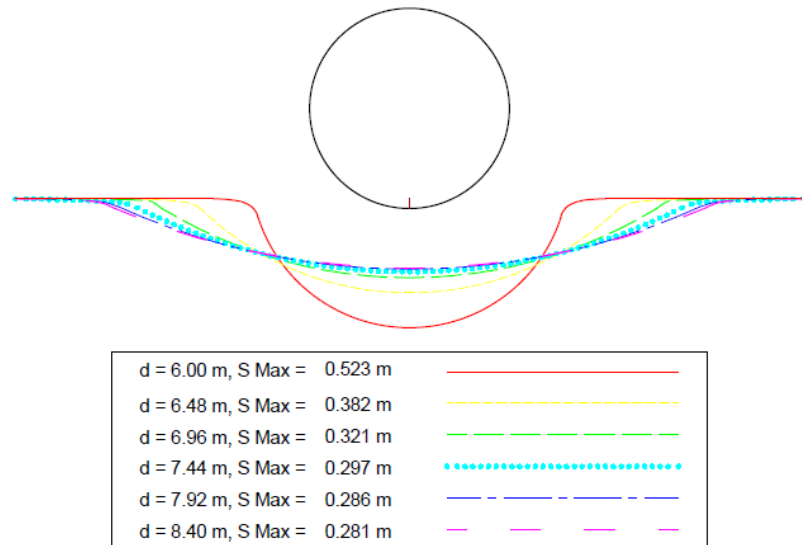
No	d (m)	Uw dasar (m/s)	Uc (m/s)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	KC	e=-0.05D		e=-0.15D		e=-0.25D	
						S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D
1	6.00	0.33	0.87	0.73	3.09	0.556	0.644	0.591	0.684	0.627	0.726
2	6.48	0.54	0.87	0.62	5.08	0.403	0.467	0.428	0.496	0.454	0.526
3	6.96	0.69	0.87	0.56	6.54	0.335	0.388	0.356	0.412	0.378	0.438
4	7.44	0.80	0.87	0.52	7.62	0.309	0.357	0.328	0.380	0.348	0.403
5	7.92	0.89	0.87	0.50	8.40	0.297	0.343	0.315	0.365	0.334	0.387
6	8.40	0.95	0.87	0.48	8.96	0.290	0.336	0.308	0.357	0.328	0.379



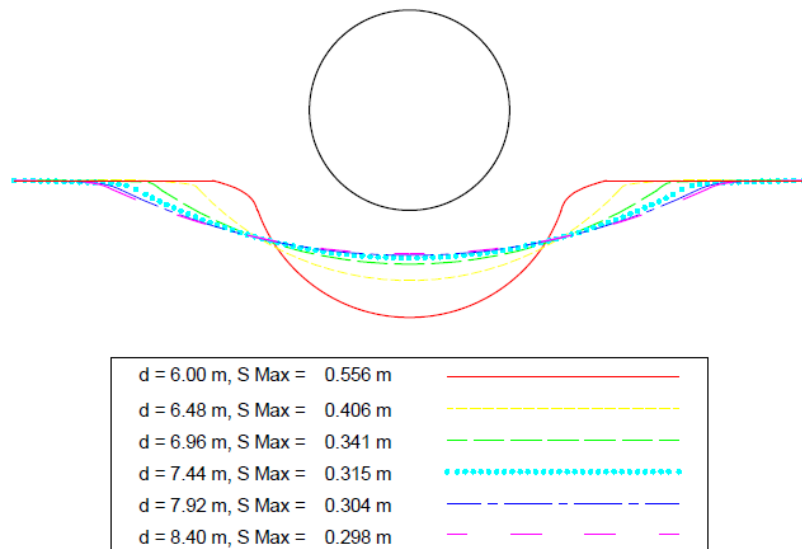
**Gambar 4.8** Grafik kedalaman scouring maksimum di zona 1 dengan D = 34 inch

Berdasarkan hasil pada zona 1 dapat disimpulkan bahwa dengan variasi kedalaman perairan dari 6.00 m hingga 8.40 m terjadi penurunan nilai  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  yang semakin kecil. Karakteristik *scouring* pada zona 1 tergantung pada nilai  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  dan zona 1 termasuk dalam rentang nilai  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  antara 0.3 – 0.7 dimana kedalaman *scouring* akan mengalami kenaikan seiring bertambahnya nilai  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$ . Oleh karenanya, hasil nilai  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  di kedalaman perairan d = 6.00 m adalah 0.73, d = 6.48 m adalah 0.62, d = 6.96 m adalah 0.56, d = 7.44 m adalah 0.52, d = 7.92 m adalah 0.50 dan d = 8.40 m adalah 0.48 menunjukkan kedalaman *scouring* akan semakin kecil dari kedalaman 6.00 meter sampai 8.40 meter. Meskipun nilai KC semakin besar dari kedalaman perairan d = 6.00 meter sampai d = 8.40 meter pengaruhnya tidak signifikan diakibatkan nilai  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  pada rentang 0.4 sampai 0.7 memiliki slope yang cukup terjal seperti yang ditunjukkan pada grafik. Hasil yang telah tercantum pada tabel sudah sesuai dengan apa yang dikemukakan oleh *Sumer* dan *Fredsoe* (1996).

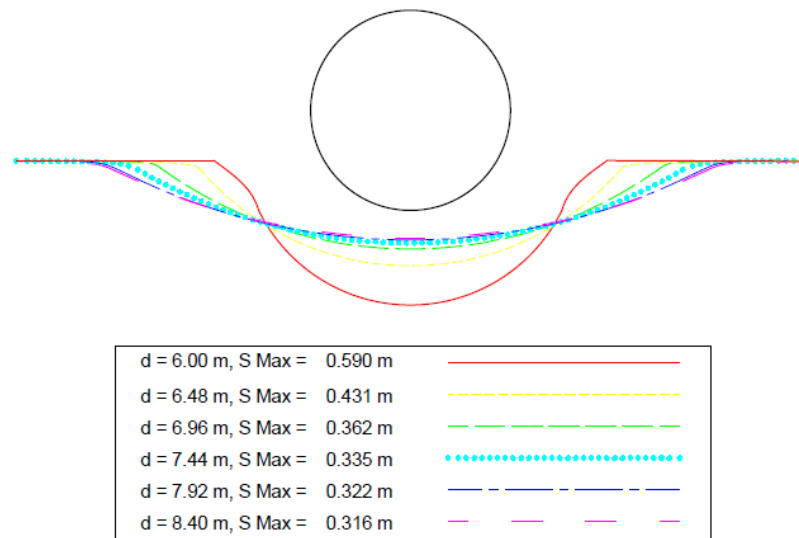
Berikut merupakan salah satu ilustrasi dari *scouring* pada kondisi diameter 32 inch pada setiap variasi  $e$  (*embedment*).



**Gambar 4.9** Pipa zona 1 diameter 32 inch dan  $e = -0.05D$



**Gambar 4.10** Pipa zona 1 diameter 32 inch dan  $e = -0.15D$



**Gambar 4.11** Pipa zona 1 diameter 32 inch dan  $e = -0.25D$

Pada ilustrasi pemodelan zona 1 dengan kondisi diameter 32 inch dapat diketahui bentuk *scouring* dari masing-masing kondisi kedalaman perairan yang ditinjau dalam penelitian tugas akhir ini. Kondisi kedalaman *scouring* terbesar terjadi pada kedalaman perairan 6.00 meter dan terendah terjadi pada kedalaman perairan 8.40 meter. Jika dilihat dari ilustrasi dapat diketahui bahwa perbedaan *scouring* dari masing-masing variasi *embedment* tidak jauh berbeda bentuknya. Untuk ilustrasi pemodelan *scouring* kondisi diameter pipa 30 inch dengan variasi  $e = -0.05 D$ ,  $e = -0.15D$  serta  $e = -0.25D$  dan pemodelan *scouring* diameter pipa 34 inch dengan variasi  $e = -0.05 D$ ,  $e = -0.15D$  serta  $e = -0.25D$  akan dilampirkan.

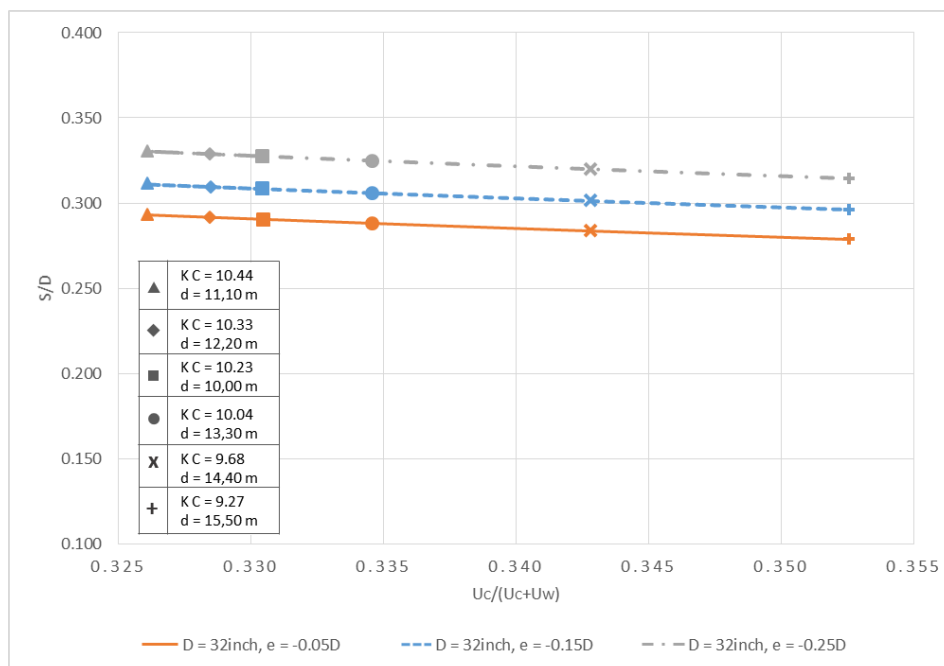
Pada ilustrasi *scouring* zona 1 diameter 32 inch diatas juga termasuk dalam pemodelan lebar *scouring* yang terjadi pada setiap variasi  $e$  (*embedment*). Nilai lebar *scouring* yang terjadi pada kedalaman  $d = 6.00$  meter adalah 0.616 meter,  $d = 6.48$  meter adalah 0.851 meter,  $d = 6.96$  meter adalah 1.003 meter,  $d = 7.44$  meter adalah 1.108 meter,  $d = 7.92$  meter adalah 1.181 meter dan  $d = 8.40$  meter adalah 1.231 meter, sedangkan untuk hasil lebar pada kondisi diameter 30 inch dan 34 inch dapat dilihat pada tabel 4.19 pada sub-bab selanjutnya. Lebar yang terbesar terjadi pada kedalaman perairan 8.40 meter sedangkan lebar terkecil terjadi pada kedalaman perairan 6.00 meter. Lebar *scouring* memiliki nilai yang sama untuk variasi  $e = -0.05 D$ ,  $e = -0.15D$  serta  $e = -0.25D$ .

## b. Zona 2

Berikut merupakan hasil perhitungan dari kedalaman *scouring* pada zona 2 dengan hanya menampilkan hasil pada kondisi diameter  $D = 32$  inch. Hasil pada kondisi diameter 30 inch dan 34 inch dilampirkan.

**Tabel 4.11** *Scouring* maksimum Zona 2 dengan  $D = 32$  inchi (0.813 m)

No	d (m)	U <sub>w</sub> dasar (m/s)	U <sub>c</sub> (m/s)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	KC	e=-0.05D		e=-0.15D		e=-0.25D	
						S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D
1	10.00	1.013	0.500	0.330	10.23	0.236	0.290	0.251	0.308	0.266	0.328
2	11.10	1.033	0.500	0.326	10.44	0.238	0.293	0.253	0.311	0.269	0.330
3	12.20	1.022	0.500	0.328	10.33	0.237	0.292	0.252	0.310	0.267	0.329
4	13.30	0.994	0.500	0.335	10.04	0.234	0.288	0.249	0.306	0.264	0.325
5	14.40	0.958	0.500	0.343	9.68	0.231	0.284	0.245	0.301	0.260	0.320
6	15.50	0.918	0.500	0.353	9.27	0.226	0.279	0.240	0.296	0.255	0.314

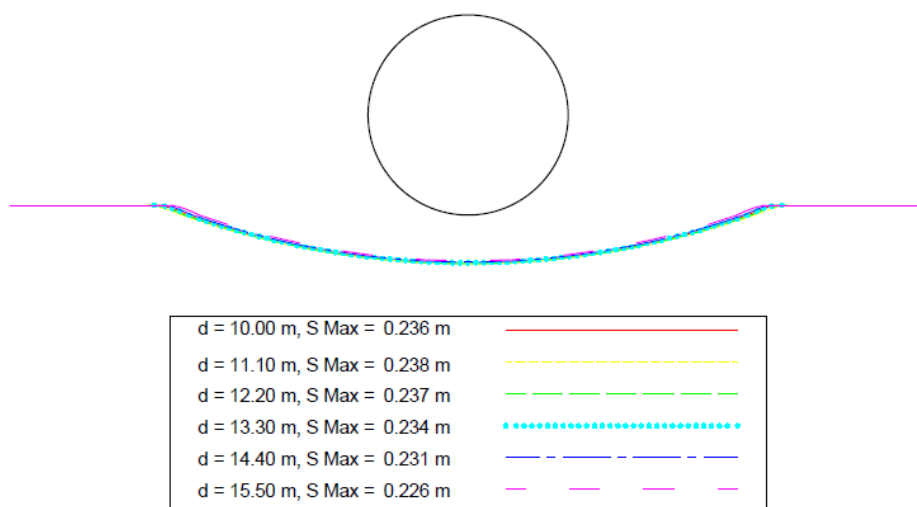


**Gambar 4.12** Grafik kedalaman *scouring* maksimum di zona 2 dengan  $D = 32$  inch

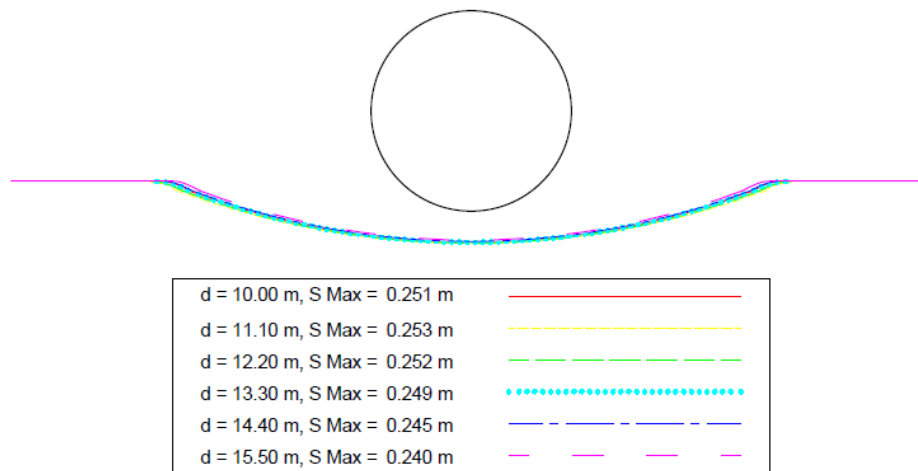
Berdasarkan hasil pada zona 2 yang memiliki variasi kedalaman perairan mulai dari 10.00 m hingga 15.50 m. Hasil menunjukkan nilai  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  dari kedalaman 15.5 m ke 11.10 m semakin kecil dan bertambah kembali ketika pada kedalaman 10.00 m.

Karakteristik *scouring* zona 2 berdasarkan  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  termasuk dalam rentang nilai 0.4 – 0.7 yang secara umum kedalaman *scouring* akan mengalami kenaikan seiring bertambahnya nilai  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  ataupun sebaliknya. Namun perlu diperhatikan di zona 2 bahwasannya nilai  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  pada masing-masing kedalaman bernilai sangat kecil sehingga faktor KC memiliki pengaruh terhadap hasil kedalaman *scouring* dimana semakin besar nilai KC maka kedalaman *scouring* juga akan semakin besar. Pada zona 2 hasil nilai  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  di kedalaman perairan d = 10.00 m adalah 0.330, d = 11.10 m adalah 0.326, d = 12.20 m adalah 0.328, d = 13.30 m adalah 0.327, d = 14.40 m adalah 0.343 dan d = 15.50 m adalah 0.353 menunjukkan bahwa *scouring* dari d = 15.50 m ke d = 11.10 m semakin besar dan pada d = 10.00 m mengalami kenaikan kembali. Sehingga pada zona 2 dapat disimpulkan bahwa untuk kedalaman *scouring* dimana nilai  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  yang sangat kecil perbedaannya akan ditentukan oleh nilai KC, ketika KC lebih besar maka kedalaman *scouring* akan lebih besar. Satu hal yang perlu diperhatikan bahwa nilai  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  dengan perbedaan yang sangat kecil tetap harus merujuk pada grafik. Hasil pada zona 2 sudah sesuai dengan apa yang dikemukakan oleh Sumer dan Fredsoe (1996).

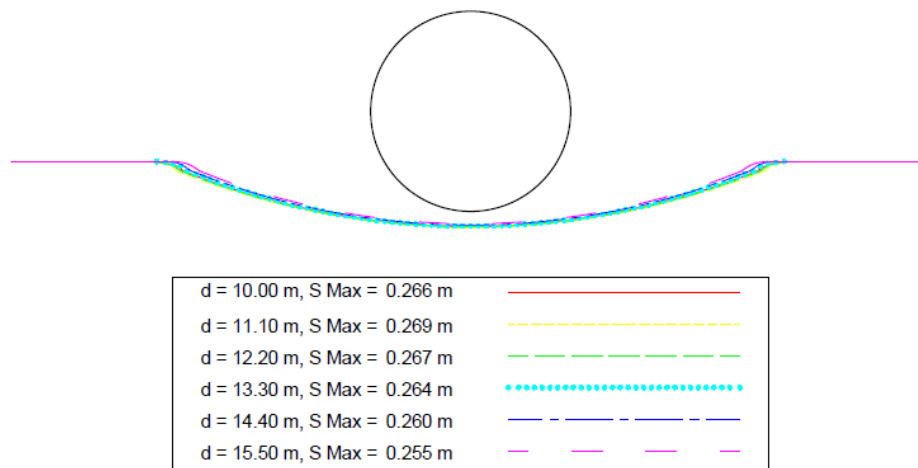
Berikut merupakan salah satu ilustrasi dari *scouring* pada kondisi diameter 32 inch pada setiap variasi e (*embedment*).



**Gambar 4.13** Pipa zona 2 diameter 32 inch dan e = -0.05D



**Gambar 4.14** Pipa zona 2 diameter 32 inch dan  $e = -0.15D$



**Gambar 4.15** Pipa zona 2 diameter 32 inch dan  $e = -0.25D$

Pada ilustrasi pemodelan zona 2 dengan kondisi diameter 32 inch dapat diketahui bentuk *scouring* dari masing-masing kondisi kedalaman perairan yang ditinjau dalam penelitian tugas akhir ini. Kondisi kedalaman *scouring* terbesar terjadi pada kedalaman perairan 11.10 meter dan terendah terjadi pada kedalaman perairan 15.50 meter. Jika dilihat dari ilustrasi dapat diketahui bahwa perbedaan *scouring* dari masing-masing



variasi *embedment* tidak jauh berbeda bentuknya. Untuk ilustrasi pemodelan *scouring* kondisi diameter pipa 30 inch dengan variasi  $e = -0.05 D$ ,  $e = -0.15D$  serta  $e = -0.25D$  dan pemodelan *scouring* diameter pipa 34 inch dengan variasi  $e = -0.05 D$ ,  $e = -0.15D$  serta  $e = -0.25D$  akan dilampirkan.

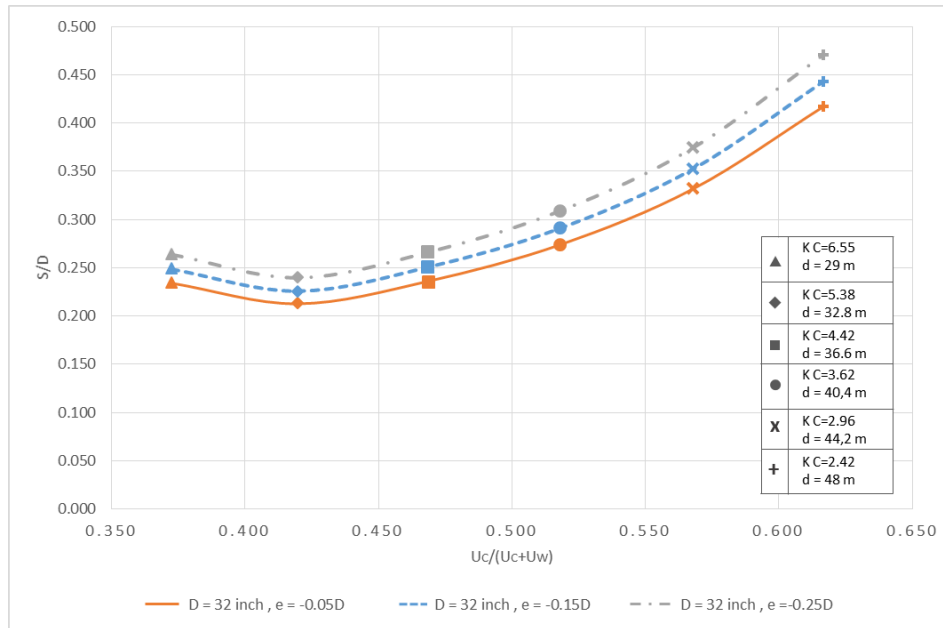
Pada ilustrasi *scouring* zona 2 diameter 32 inch diatas juga termasuk dalam pemodelan lebar *scouring* yang terjadi pada setiap variasi  $e$  (*embedment*). Nilai lebar *scouring* yang terjadi pada kedalaman  $d = 10.00$  meter adalah 1.290 meter,  $d = 11.10$  meter adalah 1.307 meter,  $d = 12.20$  meter adalah 1.297 meter,  $d = 13.30$  meter adalah 1.274 meter,  $d = 14.40$  meter adalah 1.244 meter dan  $d = 15.50$  meter adalah 1.210 meter, sedangkan untuk hasil lebar pada kondisi diameter 30 inch dan 34 inch dapat dilihat pada tabel 4.19 pada sub-bab selanjutnya. Lebar yang terbesar terjadi pada kedalaman perairan 11.10 meter sedangkan lebar terkecil terjadi pada kedalaman perairan 15.50 meter. Lebar *scouring* memiliki nilai yang sama untuk variasi  $e = -0.05 D$ ,  $e = -0.15D$  serta  $e = -0.25D$ .

### c. Zona 3

Berikut merupakan hasil perhitungan dari kedalaman *scouring* pada zona 3 dengan hanya menampilkan hasil pada kondisi diameter  $D = 32$  inch. Hasil pada kondisi diameter 30 inch dan 34 inch dilampirkan.

**Tabel 4.12** *Scouring* maksimum Zona 3 dengan  $D = 32$  inchi (0.813 m)

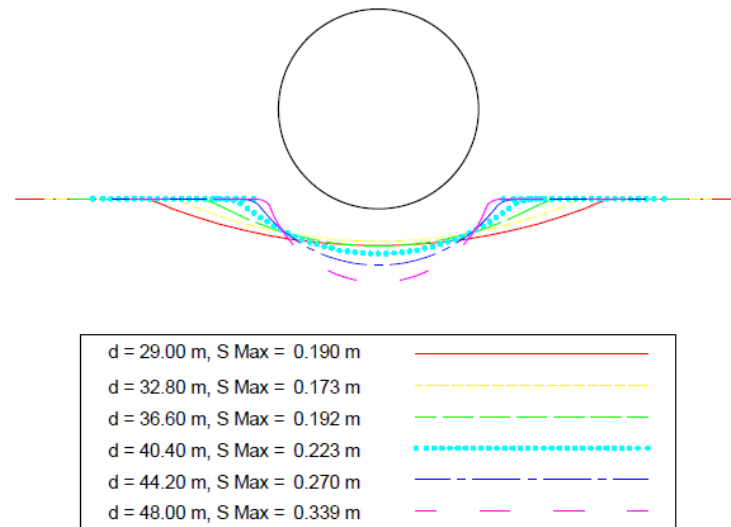
No	d (m)	Uw dasar (m/s)	Uc (m/s)	$\frac{Uc}{Uc+Uw}$	KC	e=-0.05D		e=-0.15D		e=-0.25D	
						S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D
1	29.00	0.62	0.37	0.373	6.55	0.190	0.234	0.202	0.249	0.214	0.264
2	32.80	0.51	0.37	0.420	5.38	0.173	0.213	0.184	0.226	0.195	0.240
3	36.60	0.42	0.37	0.469	4.42	0.192	0.236	0.204	0.251	0.216	0.266
4	40.40	0.34	0.37	0.518	3.62	0.223	0.274	0.236	0.291	0.251	0.309
5	44.20	0.28	0.37	0.568	2.96	0.270	0.332	0.286	0.352	0.304	0.374
6	48.00	0.23	0.37	0.617	2.42	0.339	0.417	0.360	0.443	0.382	0.470



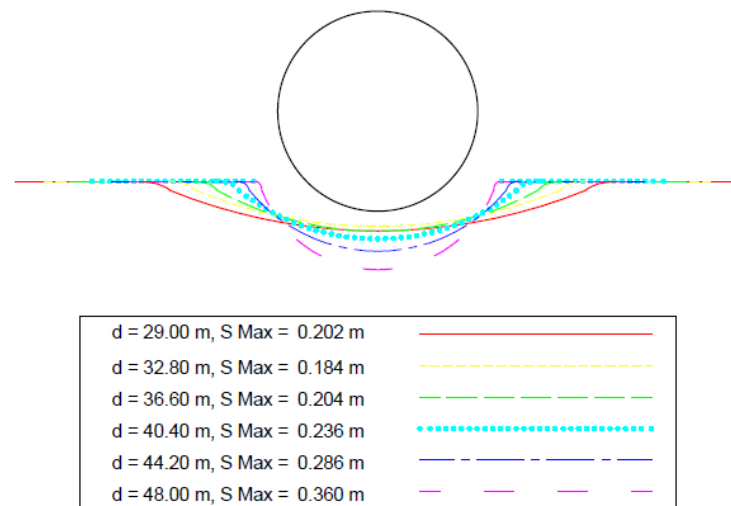
**Gambar 4.16** Grafik kedalaman scouring maksimum di zona 3 dengan  $D = 32$  inch

Berdasarkan hasil pada zona 3 variasi kedalaman perairan mulai dari 29.00 m hingga 48.00 m. Hasil menunjukkan nilai  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  dari kedalaman 48.00 m ke 32.8 m semakin kecil sementara pada kedalaman 29.00 m mengalami kenaikan kembali. Karakteristik *scouring* zona 2 berdasarkan  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  termasuk dalam rentang nilai 0.4 – 0.7 yang secara umum kedalaman *scouring* akan mengalami kenaikan seiring bertambahnya nilai  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  ataupun sebaliknya. Pada zona 3 hasil nilai  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  di kedalaman perairan  $d = 29.00$  m adalah 0.373,  $d = 32.80$  m adalah 0.420,  $d = 36.60$  m adalah 0.469,  $d = 40.40$  m adalah 0.518,  $d = 44.20$  m adalah 0.518 dan  $d = 48$  m adalah 0.617 menunjukkan bahwa *scouring* dari  $d = 48.00$  m ke  $d = 32.80$  m semakin kecil dan pada kedalaman 29.00 m kedalaman *scouring* bertambah. Kenaikan kedalaman *scouring* pada kedalaman 29.00 m terjadi akibat nilai KC pada kedalaman tersebut bernilai cukup besar dibanding yang lainnya. Sehingga pada zona 3 dapat disimpulkan bahwa kedalaman *scouring* akan semakin kecil seiring nilai  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  yang semakin kecil, namun untuk kasus tertentu seperti pada kedalaman 29.00 dimana nilai KC lebih besar maka kedalaman *scouring* kembali mengalami kenaikan. Hasil pada zona 3 sudah sesuai dengan apa yang dikemukakan oleh Sumer dan Fredsoe (1996).

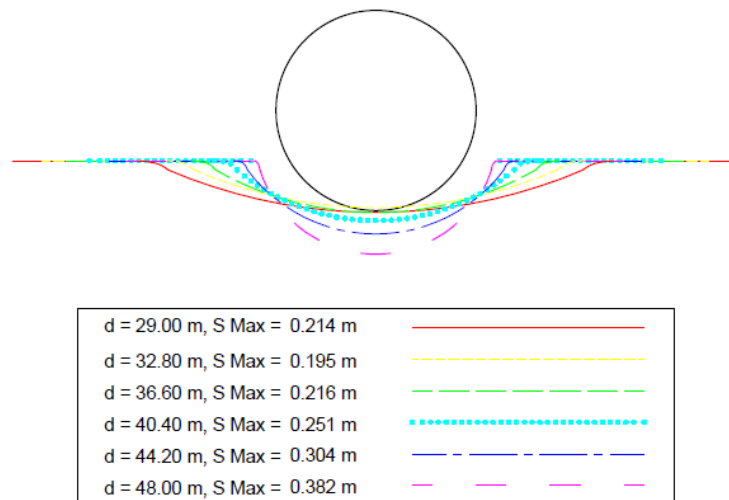
Berikut merupakan salah satu ilustrasi dari *scouring* pada kondisi diameter 32 inch pada setiap variasi *e* (*embedment*).



**Gambar 4.17** Pipa zona 3 diameter 32 inch dan  $e = -0.05D$



**Gambar 4.18** Pipa zona 3 diameter 32 inch dan  $e = -0.15D$



**Gambar 4.19** Pipa zona 3 diameter 32 inch dan  $e = -0.25D$

Pada ilustrasi pemodelan zona 3 dengan kondisi diameter 32 inch dapat diketahui bentuk *scouring* dari masing-masing kondisi kedalaman perairan yang ditinjau dalam penelitian tugas akhir ini. Kondisi kedalaman *scouring* terbesar terjadi pada kedalaman perairan 48.00 meter dan terendah terjadi pada kedalaman perairan 32.80 meter. Jika dilihat dari ilustrasi dapat diketahui bahwa perbedaan *scouring* dari masing-masing variasi *embedment* tidak jauh berbeda bentuknya. Untuk ilustrasi pemodelan *scouring* kondisi diameter pipa 30 inch dengan variasi  $e = -0.05 D$ ,  $e = -0.15D$  serta  $e = -0.25D$  dan pemodelan *scouring* diameter pipa 34 inch dengan variasi  $e = -0.05 D$ ,  $e = -0.15D$  serta  $e = -0.25D$  akan dilampirkan.

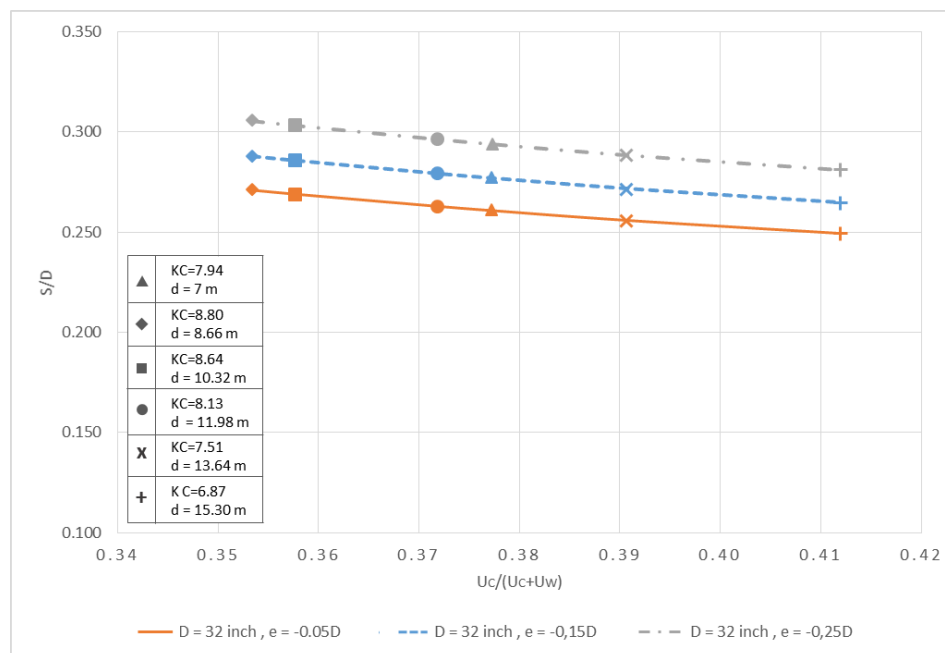
Pada ilustrasi *scouring* zona 3 diameter 32 inch diatas juga termasuk dalam pemodelan lebar *scouring* yang terjadi pada setiap variasi  $e$  (*embedment*). Nilai lebar *scouring* yang terjadi pada kedalaman  $d = 29.00$  meter adalah 0.966 meter,  $d = 32.80$  meter adalah 0.849 meter,  $d = 36.60$  meter adalah 0.747 meter,  $d = 40.40$  meter adalah 0.656 meter,  $d = 44.20$  meter adalah 0.576 meter dan  $d = 48.00$  meter adalah 0.505 meter, sedangkan untuk hasil lebar pada kondisi diameter 30 inch dan 34 inch dapat dilihat pada tabel 4.19 pada sub-bab selanjutnya. Lebar yang terbesar terjadi pada kedalaman perairan 11.10 meter sedangkan lebar terkecil terjadi pada kedalaman perairan 15.50 meter. Lebar *scouring* memiliki nilai yang sama untuk variasi  $e = -0.05 D$ ,  $e = -0.15D$  serta  $e = -0.25D$ .

#### d. Zona 17-18

Berikut merupakan hasil perhitungan dari kedalaman *scouring* pada zona 17-18 dengan hanya menampilkan hasil pada kondisi diameter D = 32 inch. Hasil pada kondisi diameter 30 inch dan 34 inch dilampirkan.

**Tabel 4.13** *Scouring* maksimum Zona 17-18 dengan D = 32 inchi (0.813 m)

No	d (m)	Uw dasar (m/s)	Uc (m/s)	$\frac{Uc}{Uc+Uw}$	KC	e=-0.05D		e=-0.15D		e=-0.25D	
						S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D
1	7.00	0.86	0.52	0.38	7.94	0.212	0.261	0.225	0.277	0.239	0.294
2	8.66	0.95	0.52	0.35	8.80	0.220	0.271	0.234	0.288	0.248	0.305
3	10.32	0.93	0.52	0.36	8.64	0.219	0.269	0.232	0.286	0.246	0.303
4	11.98	0.88	0.52	0.37	8.13	0.214	0.263	0.227	0.279	0.241	0.296
5	13.64	0.81	0.52	0.39	7.51	0.208	0.256	0.221	0.272	0.235	0.289
6	15.30	0.74	0.38	0.41	6.87	0.203	0.249	0.215	0.265	0.229	0.281

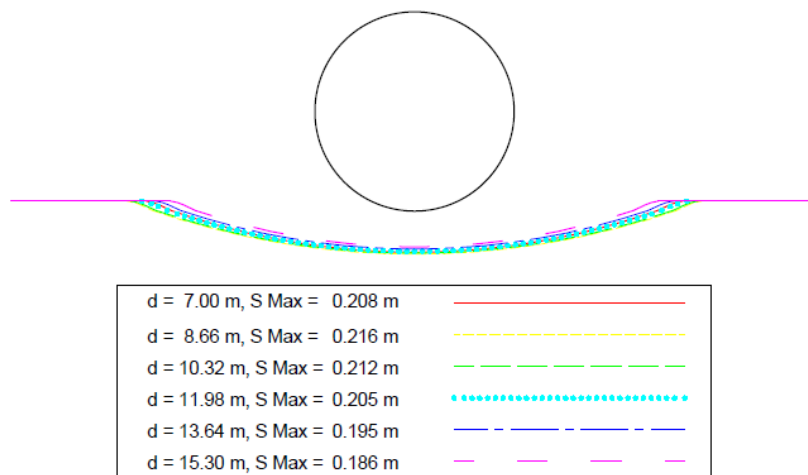


**Gambar 4.20** Grafik kedalaman *scouring* maksimum di zona 17-18 dengan D = 32 inch

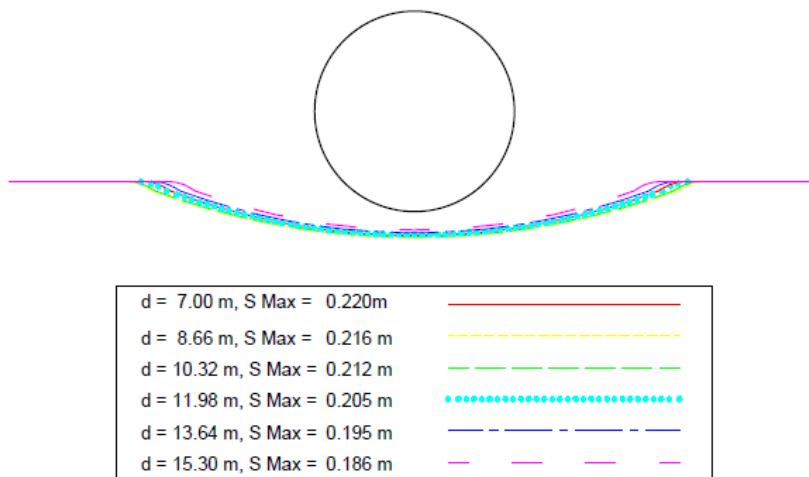
Berdasarkan hasil pada zona 17 & 18 variasi kedalaman perairan mulai dari 7.00m hingga 15.30 m. Hasil menunjukkan nilai  $\frac{Uc}{Uc+Uw}$  dari kedalaman 15.30 m ke 8.66 m semakin kecil dan membesar pada kedalaman 7.00 m. Karakteristik *scouring* zona 17

& 18 berdasarkan  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  termasuk dalam rentang nilai 0 – 0.4 yang secara umum kedalaman *scouring* akan mengalami penurunan seiring bertambahnya nilai  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$ . Pada zona 17 & 18 hasil nilai  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  di kedalaman perairan d 7.00 m adalah 0.38, d = 8.66 m adalah 0.35, d = 10.32 m adalah 0.36, d = 11.98 m adalah 0.37, d = 13.64 m adalah 0.39 dan d = 15.30 m adalah 0.41 menunjukkan bahwa *scouring* dari d = 15.30 m ke d = 8.66 m semakin besar dan pada kedalaman 7.00 m kedalaman *scouring* mengalami penurunan nilai. Penurunan nilai kedalaman *scouring* pada kedalaman 7.00 m terjadi akibat nilai KC pada kedalaman tersebut bernilai lebih kecil. Sehingga pada zona 17 & 18 dapat disimpulkan bahwa untuk kedalaman *scouring* akan semakin besar meski nilai  $\frac{U_c}{U_c+U_w}$  semakin kecil, namun untuk kasus tertentu seperti pada kedalaman 7.00 m terjadi penurunan nilai kedalaman akibat nilai KC lebih kecil. Hasil pada zona 17 & 18 sudah sesuai dengan apa yang dikemukakan oleh Sumer dan Fredsoe (1996).

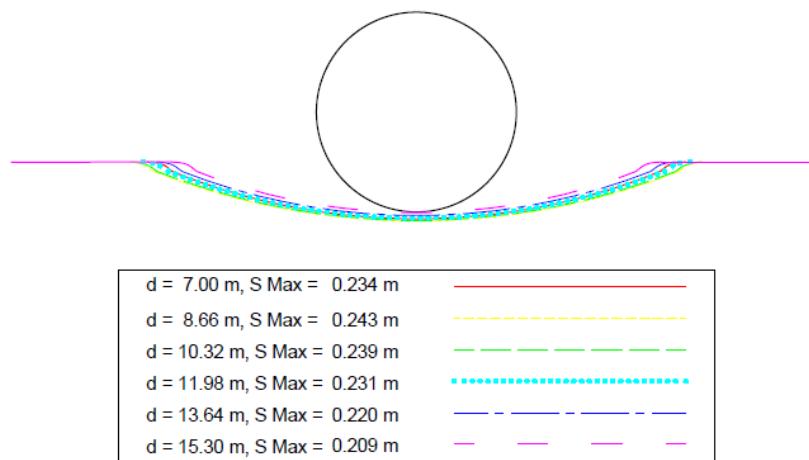
Berikut merupakan salah satu ilustrasi dari *scouring* pada kondisi diameter 32 inch pada setiap variasi e (*embedment*).



**Gambar 4.21** Pipa zona 17-18 diameter 32 inch dan  $e = -0.05D$



**Gambar 4.22** Pipa zona 17-18 diameter 32 inch dan  $e = -0.15D$



**Gambar 4.23** Pipa zona 17-18 diameter 32 inch dan  $e = -0.25D$

Pada ilustrasi pemodelan zona 17-18 dengan kondisi diameter 32 inch dapat diketahui bentuk *scouring* dari masing-masing kondisi kedalaman perairan yang ditinjau dalam penelitian tugas akhir ini. Kondisi kedalaman *scouring* terbesar terjadi pada kedalaman perairan 8.66 meter dan terendah terjadi pada kedalaman perairan 15.30 meter. Jika dilihat dari ilustrasi dapat diketahui bahwa perbedaan *scouring* dari masing-masing variasi *embedment* tidak jauh berbeda bentuknya. Untuk ilustrasi

pemodelan *scouring* kondisi diameter pipa 30 inch dengan variasi  $e = -0.05 D$ ,  $e = -0.15D$  serta  $e = -0.25D$  dan pemodelan *scouring* diameter pipa 34 inch dengan variasi  $e = -0.05 D$ ,  $e = -0.15D$  serta  $e = -0.25D$  akan dilampirkan.

Pada ilustrasi *scouring* zona 17-18 diameter 32 inch diatas juga termasuk dalam pemodelan lebar *scouring* yang terjadi pada setiap variasi  $e$  (*embedment*). Nilai lebar *scouring* yang terjadi pada kedalaman  $d = 7.00$  meter adalah 1.094 meter,  $d = 8.66$  meter adalah 1.170 meter,  $d = 10.32$  meter adalah 1.156 meter,  $d = 11.96$  meter adalah 1.111 meter,  $d = 13.64$  meter adalah 1.055 meter dan  $d = 15.30$  meter adalah 0.995 meter, sedangkan untuk hasil lebar pada kondisi diameter 30 inch dan 34 inch dapat dilihat pada tabel 4.19 pada sub-bab selanjutnya. Lebar yang terbesar terjadi pada kedalaman perairan 8.66 meter sedangkan lebar terkecil terjadi pada kedalaman perairan 15.30 meter. Lebar *scouring* memiliki nilai yang sama untuk variasi  $e = -0.05 D$ ,  $e = -0.15D$  serta  $e = -0.25D$ .

#### 4.3 Hasil Perhitungan Lebar *Scouring*

Hasil yang didapatkan dari perhitungan lebar *scouring* ditentukan oleh nilai KC yang merupakan perbandingan antara panjang gelombang dan diameter pipa. Ketika nilai KC bertambah besar maka nilai lebar *scouring* juga semakin besar. Ketika nilai diameter yang semakin besar dari 30 inchi, 32 inchi dan 34 inchi maka nilai lebar akan bertambah namun perbandingan antara lebar dan diameter semakin mengecil.

##### a. Zona 1

**Tabel 4.14** Lebar *scouring* maksimum Zona 1

No	d (m)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	D = 30 inch			D = 32 inch			D = 34 inch		
			KC	W (m)	W/D	KC	W (m)	W/D	KC	W (m)	W/D
1	6.00	0.73	3.50	0.602	0.790	3.28	0.616	0.757	3.09	0.629	0.728
2	6.48	0.62	5.75	0.832	1.092	5.40	0.851	1.047	5.08	0.869	1.006
3	6.96	0.56	7.41	0.980	1.286	6.94	1.003	1.233	6.54	1.024	1.186
4	7.44	0.52	8.64	1.083	1.421	8.10	1.108	1.363	7.62	1.131	1.310
5	7.92	0.50	9.52	1.154	1.515	8.93	1.181	1.452	8.40	1.206	1.396
6	8.40	0.48	10.15	1.203	1.579	9.52	1.231	1.514	8.96	1.257	1.456



Pada zona 1 lebar scouring semakin membesar dari kedalaman 6 meter hingga 8.40 meter disebabkan nilai KC yang turut membesar. Hasil lebar terbesar terjadi pada kedalaman perairan 8.40 meter. Untuk kondisi diameter 30 inchi memiliki nilai KC 10.15, lebar 1.203 m dan perbandingan lebar terhadap diameternya adalah 1.579 kali. Untuk kondisi 32 inchi memiliki nilai KC 9.52, lebar 1.231 m dan perbandingan lebar terhadap diameternya adalah 1.514 kali. Untuk kondisi 34 inchi memiliki nilai KC 8.96, lebar 1.257 m dan perbandingan lebar terhadap diameternya adalah 1.456 kali.

#### b. Zona 2

**Tabel 4.15** Lebar *scouring* maksimum Zona 2

No	d (m)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	D = 30 inch			D = 32 inch			D = 34 inch		
			KC	W (m)	W/D	KC	W (m)	W/D	KC	W (m)	W/D
1	10.00	0.330	10.92	1.261	1.655	10.23	1.290	1.587	9.63	1.318	1.526
2	11.10	0.326	11.13	1.277	1.676	10.44	1.307	1.607	9.82	1.335	1.545
3	12.20	0.328	11.01	1.268	1.665	10.33	1.297	1.596	9.72	1.325	1.535
4	13.30	0.335	10.71	1.246	1.635	10.04	1.274	1.568	9.45	1.302	1.507
5	14.40	0.343	10.33	1.216	1.596	9.68	1.244	1.531	9.11	1.271	1.472
6	15.50	0.353	9.89	1.183	1.552	9.27	1.210	1.489	8.73	1.236	1.431

Pada zona 2 lebar scouring semakin membesar dari kedalaman 15.50 meter hingga 11.10 meter disebabkan nilai KC yang turut membesar. Hasil lebar terbesar terjadi pada kedalaman perairan 11.10 meter. Untuk kondisi diameter 30 inchi memiliki nilai KC 11.13, lebar 1.277 m dan perbandingan lebar terhadap diameternya adalah 1.676 kali. Untuk kondisi 32 inchi memiliki nilai KC 10.44, lebar 1.307 m dan perbandingan lebar terhadap diameternya adalah 1.607 kali. Untuk kondisi 34 inchi memiliki nilai KC 9.82, lebar 1.335 m dan perbandingan lebar terhadap diameternya adalah 1.545 kali.

#### c. Zona 3

**Tabel 4.16** Lebar *scouring* maksimum Zona 3

No	d (m)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	D = 30 inch			D = 32 inch			D = 34 inch		
			KC	W (m)	W/D	KC	W (m)	W/D	KC	W (m)	W/D
1	29.00	0.373	6.99	0.944	1.239	6.55	0.966	1.188	6.17	0.986	1.142

**Tabel 4.16** (Lanjutan)

No	d (m)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	D = 30 inch			D = 32 inch			D = 34 inch		
			KC	W (m)	W/D	KC	W (m)	W/D	KC	W (m)	W/D
2	32.80	0.420	5.74	0.830	1.090	5.38	0.849	1.045	5.06	0.867	1.005
3	36.60	0.469	4.71	0.730	0.958	4.42	0.747	0.919	4.16	0.763	0.883
4	40.40	0.518	3.86	0.642	0.842	3.62	0.656	0.808	3.41	0.670	0.776
5	44.20	0.568	3.16	0.563	0.739	2.96	0.576	0.709	2.79	0.589	0.681
6	48.00	0.617	2.58	0.494	0.648	2.42	0.505	0.622	2.28	0.516	0.598

Pada zona 3 lebar scouring semakin membesar dari kedalaman 48.00 meter hingga 29.00 meter disebabkan nilai KC yang turut membesar. Hasil lebar terbesar terjadi pada kedalaman perairan 29.00 meter. Untuk kondisi diameter 30 inchi memiliki nilai KC 6.99, lebar 0.944 m dan perbandingan lebar terhadap diameternya adalah 1.239 kali. Untuk kondisi 32 inchi memiliki nilai KC 6.55, lebar 0.966 m dan perbandingan lebar terhadap diameternya adalah 1.188 kali. Untuk kondisi 34 inchi memiliki nilai KC 6.17, lebar 0.986 m & perbandingan lebar terhadap diameternya adalah 1.142 kali.

#### d. Zona 17 – 18

**Tabel 4.17** Lebar *scouring* maksimum Zona 17 & 18

No	d (m)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	D = 30 inch			D = 32 inch			D = 34 inch		
			KC	W (m)	W/D	KC	W (m)	W/D	KC	W (m)	W/D
1	7.00	0.38	8.47	1.069	1.403	7.94	1.094	1.346	7.47	1.117	1.294
2	8.66	0.35	9.39	1.143	1.501	8.80	1.170	1.439	8.28	1.195	1.383
3	10.32	0.36	9.22	1.130	1.483	8.64	1.156	1.422	8.13	1.180	1.367
4	11.98	0.37	8.67	1.086	1.425	8.13	1.111	1.366	7.65	1.134	1.313
5	13.64	0.39	8.01	1.031	1.353	7.51	1.055	1.297	7.06	1.077	1.247
6	15.30	0.41	7.32	0.973	1.277	6.87	0.995	1.225	6.46	1.017	1.177

Pada zona 17-18 lebar scouring semakin membesar dari kedalaman 15.30 meter hingga 8.66 meter disebabkan nilai KC yang turut membesar. Hasil lebar terbesar terjadi pada kedalaman perairan 8.66 meter. Untuk kondisi diameter 30 inchi memiliki nilai KC 9.39, lebar 1.143 m dan perbandingan lebar terhadap diameternya adalah 1.501 kali. Untuk kondisi 32 inchi memiliki nilai KC 8.80, lebar 1.170 m dan

perbandingan lebar terhadap diameternya adalah 1.439 kali. Untuk kondisi 34 inchi memiliki nilai KC 8.28, lebar 1.195 m dan perbandingan lebar terhadap diameternya adalah 1.383 kali.

#### 4.4 Hasil Perhitungan Waktu Pembentukan *Scouring* Maksimum

Analisis pembentukan kedalaman *scouring* terhadap waktu dibutuhkan untuk dapat memantau perkembangan kedalaman *scouring*. Dalam analisis kali ini perhitungan waktu dilakukan hanya sampai tahap terbentuknya kedalaman *scouring* maksimum. Penentuan parameter seperti *shield parameter* baik kondisi kritis ( $\theta_{cr}$ ), kondisi arus ( $\theta_c$ ) maupun kondisi gelombang ( $\theta_w$ ) sangat penting. Penelitian Sumer dan Fredsoe (2002) dikatakan bahwa *shield parameter* memiliki peran sedimen mengalami *scouring* dan juga menunjukkan seberapa lama sebuah proses *scouring* terjadi dimana semakin besar nilai *shield parameter* maka skala waktunya semakin kecil.

Dalam kondisi kombinasi kecepatan arus dan gelombang maka formula yang digunakan juga harus dapat merepresentatifkan kondisi tersebut. Berdasarkan Cheng (2013) sebuah formula skala waktu dari Fredsoe (1992) dimana nilai *shield parameter* tunggal ( arus saja atau gelombang saja ) diganti menggunakan penjumlahan antara *shield parameter* arus dan gelombang ( $\theta_c$  &  $\theta_w$ ).

Dalam hasil pemaparan di setiap zona ditampilkan informasi kedalaman perairan ( $d$ ), non-dimensional parameter ( $U_c/U_c+U_w$ ), skala waktu ( $T$ ), kedalaman *scouring* saat  $T$  ( $ST$ ), waktu saat kedalaman *scouring* maksimum ( $t_{max}$ ) serta kedalaman *scouring* maksimum ( $S_{Max}$ ). Nilai  $T$  adalah merupakan nilai waktu ketika proses pembentukan kedalaman *scouring* dalam fase progresif dan cepat. Nilai  $T$  akan berakhir ketika kedalaman sudah mencapai  $\pm 63.14\%$  dari total kedalaman maksimum. Setelah mencapai  $\pm 63.14\%$  proses *scouring* mengalami perlambatan dan cenderung *steady* sampai terbentuk kedalaman *scouring* maksimum ( $S_{Max}$ ) seperti yang ditunjukkan dari hasil penelitian Fredsoe (1992).

Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kedalaman *scouring* maksimum sesuai dengan hasil pada sub-bab 4.2 dimana ketika kedalaman *scouring* semakin besar maka waktu yang dibutuhkan juga lebih lama. Hubungan antara variasi diameter pipa dan *embedment* juga serupa dimana ketika nilainya lebih besar maka waktu yang

dibutuhkan lebih lama. Berikut merupakan hasil dari perhitungan waktu maksimal di zona 1, zona 2, zona 3 dan zona 17 & 18.

**a. Zona 1**

**Tabel 4.18** *Time scale* Zona 1 diameter pipa 30 inchi dengan  $e = -0.05D$

No	d (m)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	$\theta_{cw}$	$T^*$	T (h)	ST (m)	t max (s)	t max (m)	t max (h)	SMax (m)
1	6.00	0.73	0.08	0.35	3.593	0.310	89121	1485.35	24.76	0.491
2	6.48	0.62	0.14	0.30	3.039	0.229	72049	1200.81	20.01	0.362
3	6.96	0.56	0.24	0.22	2.185	0.193	50465	841.08	14.02	0.306
4	7.44	0.52	0.34	0.16	1.595	0.180	36445	607.42	10.12	0.285
5	7.92	0.50	0.45	0.12	1.246	0.174	28309	471.82	7.86	0.275
6	8.40	0.48	0.54	0.10	1.040	0.171	23569	392.82	6.55	0.271

Waktu propagasi *scouring* pada zona 1 dengan kondisi diameter 30 inchi dan  $e = -0.05D$  adalah seperti ditunjukkan pada tabel dan grafik diatas. Waktu maksimum dengan nilai paling tinggi ada pada kondisi kedalaman 6.00 m dimana nilai  $T = 3.593$  jam dengan  $ST = 0.310$  m dan  $t_{max} = 24.76$  jam dengan  $S_{max} = 0.491$  m. Sementara waktu maksimum paling rendah berada pada kedalaman 8.40 m dimana nilai  $T = 1.040$  jam dengan  $ST = 0.171$  m dan  $t_{max} = 6.55$  jam dengan  $S_{max} = 0.271$  m.

**Tabel 4.19** *Time scale* Zona 1 diameter pipa 30 inchi dengan  $e = -0.15D$

No	d (m)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	$\theta_{cw}$	$T^*$	T (h)	ST (m)	t max (s)	t max (m)	t max (h)	SMax (m)
1	6.00	0.73	0.08	0.35	3.593	0.329	89889	1495.15	24.97	0.521
2	6.48	0.62	0.14	0.30	3.039	0.243	72693	1211.55	20.19	0.384
3	6.96	0.56	0.24	0.22	2.185	0.205	50941	849.02	14.15	0.325
4	7.44	0.52	0.34	0.16	1.595	0.191	36781	613.02	10.22	0.302
5	7.92	0.50	0.45	0.12	1.246	0.185	28577	476.28	7.94	0.292
6	8.40	0.48	0.54	0.10	1.040	0.181	23785	396.42	6.61	0.287

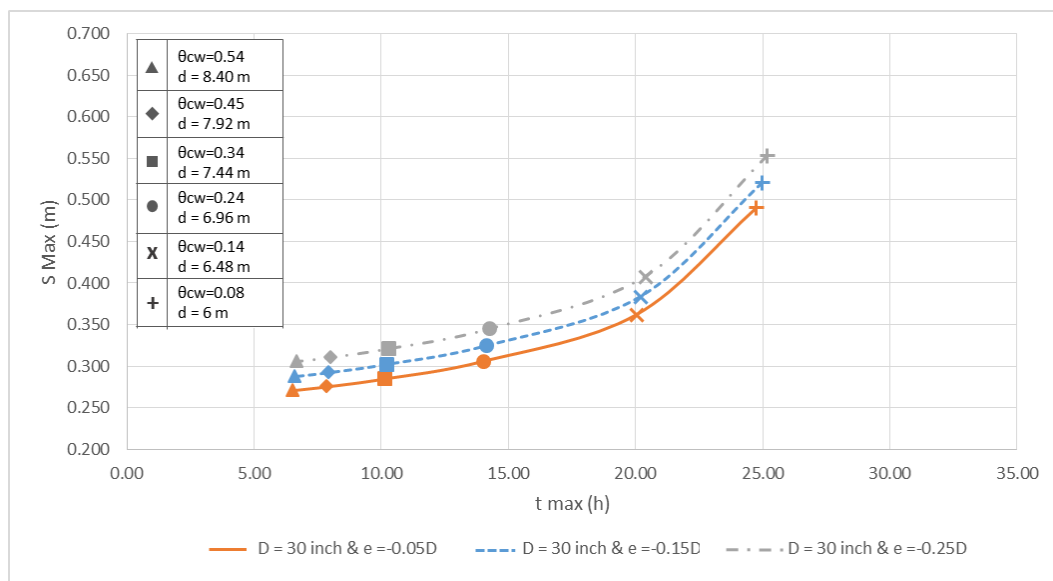
Waktu propagasi *scouring* pada zona 1 dengan kondisi diameter 32 inchi dan  $e = -0.15D$  adalah seperti ditunjukkan pada tabel dan grafik diatas. Waktu maksimum dengan nilai paling tinggi ada pada kondisi kedalaman 6.00 m dimana nilai  $T = 3.593$

jam dengan  $ST = 0.329$  m dan  $t_{\max} = 24.97$  jam dengan  $S_{\max} = 0.521$  m. Sementara waktu maksimum paling rendah berada pada kedalaman 8.40 m dimana nilai  $T = 1.040$  jam dengan  $ST = 0.181$  m dan  $t_{\max} = 6.61$  jam dengan  $S_{\max} = 0.287$  m.

**Tabel 4.20** *Time scale* Zona 1 diameter pipa 30 inchi dengan  $e = -0.25D$

No	d (m)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	$\theta_{cw}$	$T^*$	T (h)	ST (m)	$t_{\max}$ (s)	$t_{\max}$ (m)	$t_{\max}$ (h)	SMax (m)
1	6.00	0.73	0.08	0.35	3.593	0.350	90657	1510.95	25.18	0.553
2	6.48	0.62	0.14	0.30	3.039	0.258	73357	1222.62	20.38	0.408
3	6.96	0.56	0.24	0.22	2.185	0.218	51409	856.82	14.28	0.345
4	7.44	0.52	0.34	0.16	1.595	0.203	37129	618.82	10.31	0.321
5	7.92	0.50	0.45	0.12	1.246	0.196	28845	480.75	8.01	0.310
6	8.40	0.48	0.54	0.10	1.040	0.193	24013	400.22	6.67	0.305

Waktu propagasi *scouring* pada zona 1 dengan kondisi diameter 34 inchi dan  $e = -0.25D$  adalah seperti ditunjukkan pada tabel dan grafik diatas. Waktu maksimum dengan nilai paling tinggi ada pada kondisi kedalaman 6.00 m dimana nilai  $T = 3.593$  jam dengan  $ST = 0.350$  m dan  $t_{\max} = 25.18$  jam dengan  $S_{\max} = 0.553$  m. Sementara waktu maksimum paling rendah berada pada kedalaman 8.40 m dimana nilai  $T = 1.040$  jam dengan  $ST = 0.193$  m dan  $t_{\max} = 6.67$  jam dengan  $S_{\max} = 0.305$  m.



**Gambar 4.24** Grafik jangka waktu scouring maksimum di zona 1 dengan  $D = 30$  inch

Grafik tersebut merupakan perbandingan  $t_{\max}$  dengan kedalaman *scouring* maksimum untuk tiap kedalaman  $e$ . Sebagai contoh, untuk kedalaman  $d = 6.00$  m dan  $e = -0.05 D$  memiliki nilai  $S_{\max} = 0.491$  m dan  $t_{\max} = 24.76$  jam, untuk kedalaman  $d = 6.00$  m dan  $e = -0.15 D$  memiliki nilai  $S_{\max} = 0.521$  m dan  $t_{\max} = 24.97$  jam, untuk kedalaman  $d = 6.00$  m dan  $e = -0.25 D$  memiliki nilai  $S_{\max} = 0.553$  m dan  $t_{\max} = 25.18$  jam. Hasil tersebut menunjukkan nilai  $t_{\max}$  untuk nilai  $e = -0.25D$  sedikit lebih lama dibandingkan  $t_{\max}$  untuk nilai  $e = -0.15D$  maupun  $e = -0.05D$ .

**Tabel 4.21** *Time scale* Zona 1 diameter pipa 32 inchi dengan  $e = -0.05D$

No	d (m)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	$\theta_{cw}$	$T^*$	T (h)	ST (m)	t max (s)	t max (m)	t max (h)	SMax (m)
1	6.00	0.73	0.08	0.35	4.088	0.331	102329	1705.48	28.42	0.523
2	6.48	0.62	0.14	0.30	3.458	0.241	82645	1377.42	22.96	0.382
3	6.96	0.56	0.24	0.22	2.486	0.203	57845	964.08	16.07	0.321
4	7.44	0.52	0.34	0.16	1.815	0.188	41737	695.62	11.59	0.297
5	7.92	0.50	0.45	0.12	1.418	0.181	32409	540.15	9.00	0.286
6	8.40	0.48	0.54	0.10	1.183	0.178	26969	449.48	7.49	0.281

Waktu propagasi *scouring* pada zona 1 dengan kondisi diameter 32 inchi dan  $e = -0.05D$  adalah seperti ditunjukkan pada tabel dan grafik diatas. Waktu maksimum dengan nilai paling tinggi ada pada kondisi kedalaman 6.00 m dimana nilai  $T = 4.088$  jam dengan  $ST = 0.331$  m dan  $t_{\max} = 28.42$  jam dengan  $S_{\max} = 0.523$  m. Sementara waktu maksimum paling rendah berada pada kedalaman 8.40 m dimana nilai  $T = 1.183$  jam dengan  $ST = 0.178$  m dan  $t_{\max} = 7.49$  jam dengan  $S_{\max} = 0.281$  m.

**Tabel 4.22** *Time scale* Zona 1 diameter pipa 32 inchi dengan  $e = -0.15D$

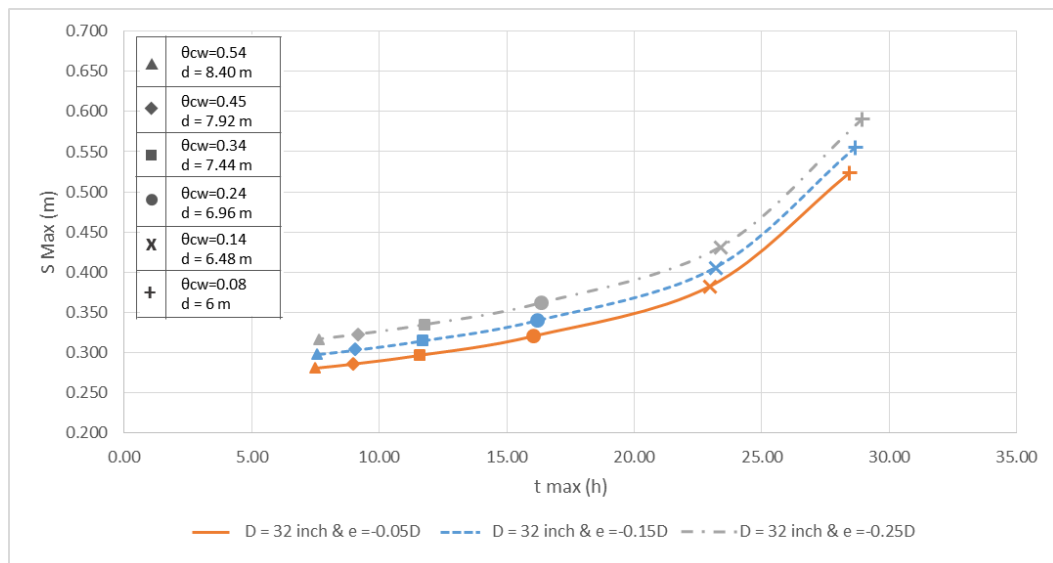
No	d (m)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	$\theta_{cw}$	$T^*$	T (h)	ST (m)	t max (s)	t max (m)	t max (h)	SMax (m)
1	6.00	0.73	0.08	0.35	4.088	0.351	103229	1720.48	28.67	0.556
2	6.48	0.62	0.14	0.30	3.458	0.257	83405	1390.08	23.17	0.406
3	6.96	0.56	0.24	0.22	2.486	0.216	58389	973.15	16.22	0.341
4	7.44	0.52	0.34	0.16	1.815	0.199	42121	702.02	11.70	0.315
5	7.92	0.50	0.45	0.12	1.418	0.192	32721	545.35	9.09	0.304
6	8.40	0.48	0.54	0.10	1.183	0.188	27221	453.68	7.56	0.298

Waktu propagasi *scouring* zona 1 kondisi diameter 32 inci &  $e = -0.15D$  ditunjukkan pada tabel dan grafik diatas. Waktu maksimum dengan nilai paling tinggi ada pada kondisi kedalaman 6.00 m dimana nilai  $T = 4.088$  jam dengan  $ST = 0.351$  m &  $t_{max} = 28.67$  jam dengan  $S_{max} = 0.556$  m. Waktu maksimum paling rendah berada pada kedalaman 8.40 m dimana nilai  $T = 1.183$  jam dengan  $ST = 0.188$  m dan  $t_{max} = 7.56$  jam dengan  $S_{max} = 0.298$  m.

**Tabel 4.23** *Time scale* Zona 1 diameter pipa 32 inci dengan  $e = -0.25D$

No	d (m)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	$\theta_{cw}$	$T^*$	T (h)	ST (m)	$t_{max}$ (s)	$t_{max}$ (m)	$t_{max}$ (h)	SMax (m)
1	6.00	0.73	0.08	0.35	4.088	0.373	104101	1735.02	28.92	0.590
2	6.48	0.62	0.14	0.30	3.458	0.272	84149	1402.48	23.37	0.431
3	6.96	0.56	0.24	0.22	2.486	0.229	58921	982.02	16.37	0.362
4	7.44	0.52	0.34	0.16	1.815	0.212	42525	708.75	11.81	0.335
5	7.92	0.50	0.45	0.12	1.418	0.204	33013	550.22	9.17	0.322
6	8.40	0.48	0.54	0.10	1.183	0.200	27469	457.82	7.63	0.316

Waktu propagasi *scouring* zona 1 kondisi diameter 32 inci &  $e = -0.05D$  ditunjukkan pada tabel dan grafik diatas. Waktu maksimum dengan nilai paling tinggi ada pada kondisi kedalaman 6.00. Waktu maksimum paling rendah pada kedalaman 8.40 m.



**Gambar 4.25** Grafik jangka waktu scouring maksimum di zona 1 dengan D = 32 inch

Grafik tersebut merupakan sebuah perbandingan antara  $t_{\max}$  dengan kedalaman *scouring* maksimum untuk tiap kedalaman  $e$ . Sebagai contoh, untuk kedalaman  $d = 6.00$  m dan  $e = -0.05 D$  memiliki nilai  $S_{\max} = 0.523$  m dan  $t_{\max} = 28.42$  jam, untuk kedalaman  $d = 6.00$  m dan  $e = -0.15 D$  memiliki nilai  $S_{\max} = 0.556$  m dan  $t_{\max} = 28.67$  jam, untuk kedalaman  $d = 6.00$  m dan  $e = -0.25 D$  memiliki nilai  $S_{\max} = 0.590$  m dan  $t_{\max} = 28.92$  jam. Hasil tersebut menunjukkan  $t_{\max}$  untuk nilai  $e = -0.25D$  sedikit lebih lama dibandingkan  $t_{\max}$  untuk nilai  $e = -0.15D$  maupun  $e = -0.05D$ .

**Tabel 4.24** *Time scale* Zona 1 diameter pipa 34 inci dengan  $e = -0.05D$

No	d (m)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	$\theta_{cw}$	$T^*$	T (h)	ST (m)	t max (s)	t max (m)	t max (h)	SMax (m)
1	6.00	0.73	0.08	0.35	4.615	0.351	116533	1942.22	32.37	0.556
2	6.48	0.62	0.14	0.30	3.904	0.255	94049	1567.48	26.12	0.403
3	6.96	0.56	0.24	0.22	2.806	0.212	65733	1095.55	18.26	0.335
4	7.44	0.52	0.34	0.16	2.049	0.195	47409	790.15	13.17	0.309
5	7.92	0.50	0.45	0.12	1.601	0.188	36805	613.42	10.22	0.297
6	8.40	0.48	0.54	0.10	1.336	0.168	30597	509.95	8.50	0.290

Waktu propagasi *scouring* pada zona 1 dengan kondisi diameter 34 inci dan  $e = -0.05D$  adalah seperti ditunjukkan pada tabel dan grafik diatas. Waktu maksimum dengan nilai paling tinggi ada pada kondisi kedalaman 6.00 m. Sementara waktu maksimum paling rendah berada pada kedalaman 8.40

**Tabel 4.25** *Time scale* Zona 1 diameter pipa 34 inci dengan  $e = -0.15D$

No	d (m)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	$\theta_{cw}$	$T^*$	T (h)	ST (m)	t max (s)	t max (m)	t max (h)	SMax (m)
1	6.00	0.73	0.08	0.35	4.615	0.374	117549	1959.15	32.65	0.591
2	6.48	0.62	0.14	0.30	3.904	0.271	94897	1581.62	26.36	0.428
3	6.96	0.56	0.24	0.22	2.806	0.225	66349	1105.52	18.43	0.356
4	7.44	0.52	0.34	0.16	2.049	0.207	47849	797.48	13.29	0.328
5	7.92	0.50	0.45	0.12	1.601	0.199	37141	619.02	10.32	0.315
6	8.40	0.48	0.54	0.10	1.336	0.195	30889	514.82	8.58	0.308

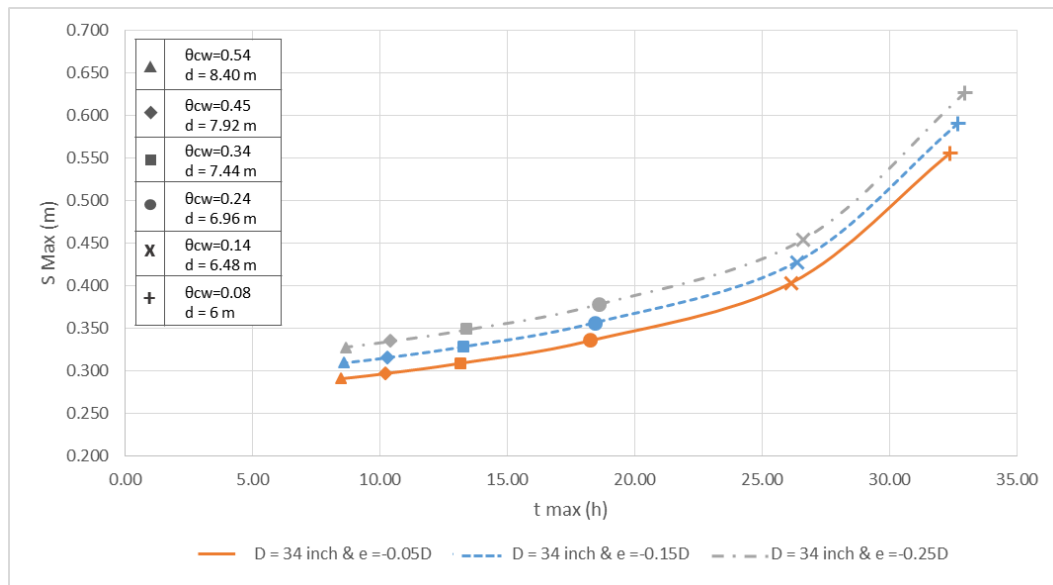


Waktu propagasi *scouring* pada zona 1 dengan kondisi diameter 34 inchi dan  $e = -0.15D$  adalah seperti ditunjukkan pada tabel dan grafik diatas. Waktu maksimum dengan nilai paling tinggi ada pada kondisi kedalaman 6.00 m. Sementara waktu maksimum paling rendah berada pada kedalaman 8.40 m.

**Tabel 4.26** Time scale Zona 1 diameter pipa 34 inchi dengan  $e = -0.25D$

No	d (m)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	$\theta_{cw}$	$T^*$	T (h)	ST (m)	t max (s)	t max (m)	t max (h)	SMax (m)
1	6.00	0.73	0.08	0.35	4.615	0.396	118533	1975.55	32.93	0.627
2	6.48	0.62	0.14	0.30	3.904	0.287	95725	1595.42	26.59	0.454
3	6.96	0.56	0.24	0.22	2.806	0.239	66953	1115.88	18.60	0.378
4	7.44	0.52	0.34	0.16	2.049	0.220	48285	804.75	13.41	0.348
5	7.92	0.50	0.45	0.12	1.601	0.211	37481	624.68	10.41	0.334
6	8.40	0.48	0.54	0.10	1.336	0.207	31189	519.82	8.66	0.328

Waktu propagasi *scouring* pada zona 1 dengan kondisi diameter 34 inchi dan  $e = -0.25D$  adalah seperti ditunjukkan pada tabel dan grafik diatas. Waktu maksimum dengan nilai paling tinggi ada pada kondisi kedalaman 6.00 m. Sementara waktu maksimum paling rendah berada pada kedalaman 8.40 m.



**Gambar 4.26** Grafik jangka waktu scouring maksimum di zona 1 dengan D = 34 inchi

Pada grafik tersebut merupakan sebuah perbandingan antara nilai  $t_{\max}$  dengan kedalaman *scouring* maksimum untuk tiap kedalaman  $e$ . Sebagai contoh, untuk kedalaman  $d = 6.00$  m dan  $e = -0.05 D$  memiliki nilai  $S_{\max} = 0.523$  m dan  $t_{\max} = 28.42$  jam, untuk kedalaman  $d = 6.00$  m dan  $e = -0.15 D$  memiliki nilai  $S_{\max} = 0.556$  m dan  $t_{\max} = 28.67$  jam, untuk kedalaman  $d = 6.00$  m dan  $e = -0.25 D$  memiliki nilai  $S_{\max} = 0.590$  m dan  $t_{\max} = 28.92$  jam. Dari hasil tersebut menunjukkan nilai  $t_{\max}$  untuk nilai  $e = -0.25D$  sedikit lebih lama dibandingkan  $t_{\max}$  untuk nilai  $e = -0.15D$  maupun  $e = -0.05D$ .

Pada zona 1 sebagaimana ditampilkan pada grafik proses waktu propagasi *scouring* dimulai dari detik awal hingga mencapai detik *scouring* maksimum. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa slope curam dari grafik adalah nilai skala waktu ( $T$ ) yang merupakan proses *scouring* progresif (63.14% dari kedalaman *scouring* maksimum). Skala waktu dari kedalaman 8.40 m - 6.00 m mengalami peningkatan sehingga pada kedalaman 6.00 m memiliki waktu paling lama terbentuknya *scouring* maksimum. Sementara pada grafik menunjukkan perbandingan antara nilai waktu maksimum untuk tiap variasi diameter ( $D$ ) dan *embedment* ( $e$ ), grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai  $D$  dan  $e$  yang lebih besar menyebabkan waktu *scouring* sedikit lebih lama. Hal tersebut sesuai dengan yang ditunjukkan pada penelitian *Fredsoe et.al (1992)*.

## b. Zona 2

Berikut merupakan hasil perhitungan skala waktu pada zona 2 untuk kondisi diameter 32 inchi dan tiga variasi  $e$  ( $e = -0.05D$ ,  $e = -0.15D$  &  $e = -0.25D$ ). Hasil pada kondisi  $D = 30$  inchi dan  $D = 34$  inchi dilampirkan.

**Tabel 4.27** *Time scale* Zona 2 diameter pipa 32 inchi dengan  $e = -0.05D$

No	d (m)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	$\theta_{cw}$	$T^*$	T (h)	ST (m)	t max (s)	t max (m)	t max (h)	SMax (m)
1	10.00	0.330	0.46	0.08	0.935	0.149	20729	345.48	5.76	0.236
2	11.10	0.326	0.51	0.07	0.849	0.151	18837	313.95	4.62	0.238
3	12.20	0.328	0.50	0.08	0.867	0.150	19237	320.62	4.72	0.237
4	13.30	0.355	0.46	0.08	0.947	0.148	20957	349.28	5.14	0.234
5	14.40	0.50	0.40	0.09	1.072	0.146	23685	394.75	5.81	0.231
6	15.50	0.48	0.35	0.11	1.245	0.143	27939	456.55	6.73	0.226

Waktu propagasi *scouring* pada zona 2 dengan kondisi diameter 32 inci dan  $e = -0.05D$  adalah seperti ditunjukkan pada tabel dan grafik diatas. Waktu maksimum dengan nilai paling tinggi ada pada kondisi kedalaman 15.50 m dimana nilai  $T = 1.245$  jam dengan  $ST = 0.143$  m dan  $t_{max} = 6.73$  jam dengan  $S_{max} = 0.226$  m. Sementara waktu maksimum paling rendah berada pada kedalaman 11.10 m dimana nilai  $T = 0.849$  jam dengan  $ST = 0.151$  m dan  $t_{max} = 4.62$  jam dengan  $S_{max} = 0.238$  m.

**Tabel 4.28** *Time scale* Zona 2 diameter pipa 32 inci dengan  $e = -0.15D$

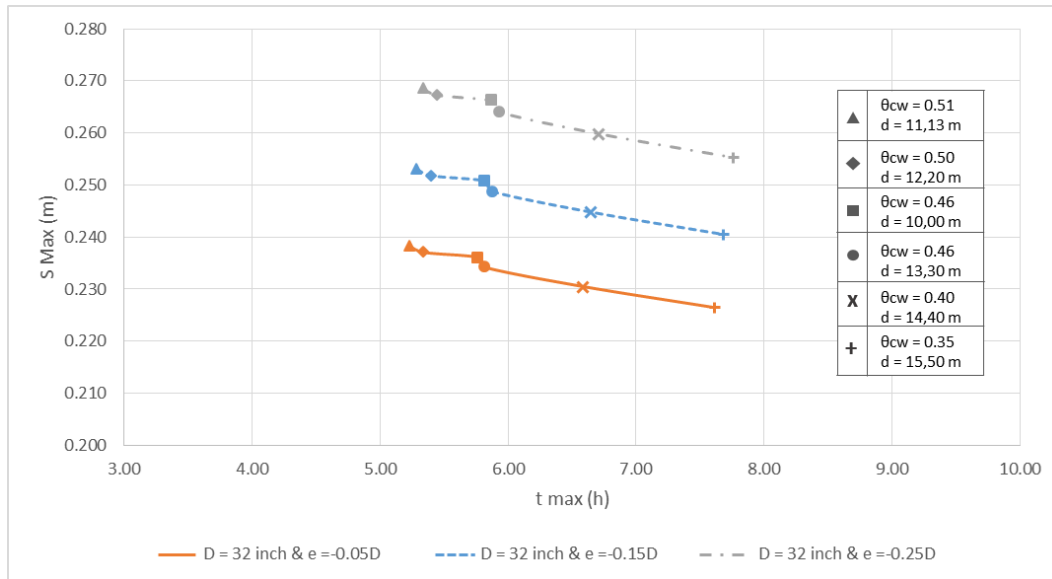
No	d (m)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	$\theta_{cw}$	$T^*$	T (h)	ST (m)	$t_{max}$ (s)	$t_{max}$ (m)	$t_{max}$ (h)	SMax (m)
1	10.00	0.330	0.46	0.08	0.935	0.159	20937	348.95	5.82	0.251
2	11.10	0.326	0.51	0.07	0.849	0.160	19021	317.02	5.28	0.253
3	12.20	0.328	0.50	0.08	0.867	0.159	19429	323.82	5.40	0.252
4	13.30	0.355	0.46	0.08	0.947	0.157	21165	352.75	5.88	0.249
5	14.40	0.50	0.40	0.09	1.072	0.155	23913	398.55	6.44	0.245
6	15.50	0.48	0.35	0.11	1.245	0.152	27665	461.08	7.68	0.240

Waktu propagasi *scouring* pada zona 2 dengan kondisi diameter 32 inci dan  $e = -0.15D$  adalah seperti ditunjukkan pada tabel dan grafik diatas. Waktu maksimum dengan nilai paling tinggi ada pada kondisi kedalaman 15.50 m dimana nilai  $T = 1.245$  jam dengan  $ST = 0.152$  m dan  $t_{max} = 7.68$  jam dengan  $S_{max} = 0.240$  m. Sementara waktu maksimum paling rendah berada pada kedalaman 11.10 m dimana nilai  $T = 0.849$  jam dengan  $ST = 0.160$  m dan  $t_{max} = 5.28$  jam dengan  $S_{max} = 0.253$  m.

**Tabel 4.29** *Time scale* Zona 2 diameter pipa 32 inci dengan  $e = -0.25D$

No	d (m)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	$\theta_{cw}$	$T^*$	T (h)	ST (m)	$t_{max}$ (s)	$t_{max}$ (m)	$t_{max}$ (h)	SMax (m)
1	10.00	0.330	0.46	0.08	0.935	0.168	21129	352.15	5.87	0.266
2	11.10	0.326	0.51	0.07	0.849	0.170	19209	320.15	5.34	0.269
3	12.20	0.328	0.50	0.08	0.867	0.169	19609	326.82	5.45	0.267
4	13.30	0.355	0.46	0.08	0.947	0.167	21365	356.08	5.93	0.264
5	14.40	0.50	0.40	0.09	1.072	0.164	24141	402.35	6.71	0.260
6	15.50	0.48	0.35	0.11	1.245	0.161	27937	465.62	7.76	0.255

Waktu propagasi *scouring* pada zona 2 kondisi diameter 32 inci dan  $e = -0.25D$  ditunjukkan pada tabel dan grafik diatas. Waktu maksimum paling tinggi memiliki kondisi  $d = 15.50$  m dimana nilai  $T = 1.245$  jam dengan  $ST = 0.161$  m dan  $t_{max} = 7.76$  jam dengan  $S_{max} = 0.255$  m. Waktu maksimum terendah memiliki  $d = 11.10$  m dimana nilai  $T = 0.849$  jam dengan  $ST = 0.170$  m dan  $t_{max} = 5.34$  jam dengan  $S_{max} = 0.269$  m.



**Gambar 4.27** Grafik jangka waktu scouring maksimum di zona 2 dengan  $D = 32$  inch

Pada grafik tersebut merupakan sebuah perbandingan antara nilai  $t_{max}$  dengan kedalaman *scouring* maksimum untuk tiap kedalaman  $e$ . Sebagai contoh, untuk kedalaman  $d = 15.50$  m dan  $e = -0.05D$  memiliki nilai  $S_{max} = 0.236$  m dan  $t_{max} = 7.61$  jam, untuk kedalaman  $d = 15.50$  m dan  $e = -0.15D$  memiliki nilai  $S_{max} = 0.240$  m dan  $t_{max} = 7.68$  jam, untuk kedalaman  $d = 15.50$  m dan  $e = -0.25D$  memiliki nilai  $S_{max} = 0.255$  m dan  $t_{max} = 7.76$  jam. Dari hasil tersebut menunjukkan nilai  $t_{maks}$  untuk nilai  $e = -0.25D$  sedikit lebih lama dibandingkan  $t_{maks}$  untuk nilai  $e = -0.15D$  maupun  $e = -0.05D$ .

Pada zona 2 sebagaimana ditampilkan pada grafik bagaimana proses waktu propagasi *scouring* dimulai dari detik awal hingga mencapai detik *scouring* maksimum. Pada grafik tersebut juga dapat dilihat bahwa slope curam dari grafik adalah nilai skala waktu ( $T$ ) yang merupakan proses *scouring* progresif ( 63.14% dari

kedalaman *scouring* maksimum ). Skala waktu dari kedalaman 15.50 m sampai 11.10 m mengalami penurunan dan meningkat kembali pada kedalaman 10.00 m. Kedalaman 15.50 m memiliki waktu paling lama terbentuknya *scouring* maksimum. Sementara pada grafik menunjukkan perbandingan antara nilai waktu maksimum untuk tiap variasi diameter ( $D$ ) dan *embedment* ( $e$ ), pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai  $D$  dan  $e$  yang lebih besar menyebabkan waktu *scouring* sedikit lebih lama. Hal tersebut sesuai dengan yang ditunjukkan pada hasil penelitian *Fredsoe et.al* (1992).

### c. Zona 3

Berikut merupakan hasil perhitungan skala waktu pada zona 3 untuk kondisi diameter 32 inchi dan tiga variasi  $e$  ( $e=-0.05D$ ,  $e=-0.15D$  &  $e=-0.25D$ ). Hasil pada kondisi  $D = 30$  inchi dan  $D = 34$  inchi dilampirkan.

**Tabel 4.30** *Time scale* Zona 3 diameter pipa 32 inchi dengan  $e = -0.05D$

No	d (m)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	$\theta_{cw}$	$T^*$	T (h)	ST (m)	t max (s)	t max (m)	t max (h)	SMax (m)
1	29.00	0.373	0.45	0.07	0.788	0.120	16853	280.88	4.68	0.190
2	32.80	0.420	0.49	0.06	0.731	0.109	15385	256.42	4.27	0.173
3	36.60	0.469	0.47	0.07	0.759	0.121	16269	271.15	4.52	0.192
4	40.40	0.518	0.42	0.07	0.840	0.141	18449	307.48	5.12	0.223
5	44.20	0.568	0.37	0.08	0.962	0.171	21793	363.22	6.05	0.270
6	48.00	0.617	0.31	0.10	1.128	0.214	26477	441.28	7.35	0.339

Waktu propagasi *scouring* pada zona 3 dengan kondisi diameter 32 inchi dan  $e = -0.05D$  adalah seperti ditunjukkan pada tabel dan grafik diatas. Waktu maksimum dengan nilai paling tinggi ada pada kondisi kedalaman 48.00 m dimana nilai  $T = 1.128$  jam dengan  $ST = 0.214$  m dan  $t_{max} = 7.35$  jam dengan  $S_{max} = 0.339$  m. Sementara waktu maksimum paling rendah berada pada kedalaman 32.80 m dimana nilai  $T = 0.731$  jam dengan  $ST = 0.109$  m dan  $t_{max} = 4.27$  jam dengan  $S_{max} = 0.173$  m.

**Tabel 4.31** *Time scale* Zona 3 diameter pipa 32 inchi dengan  $e = -0.15D$ 

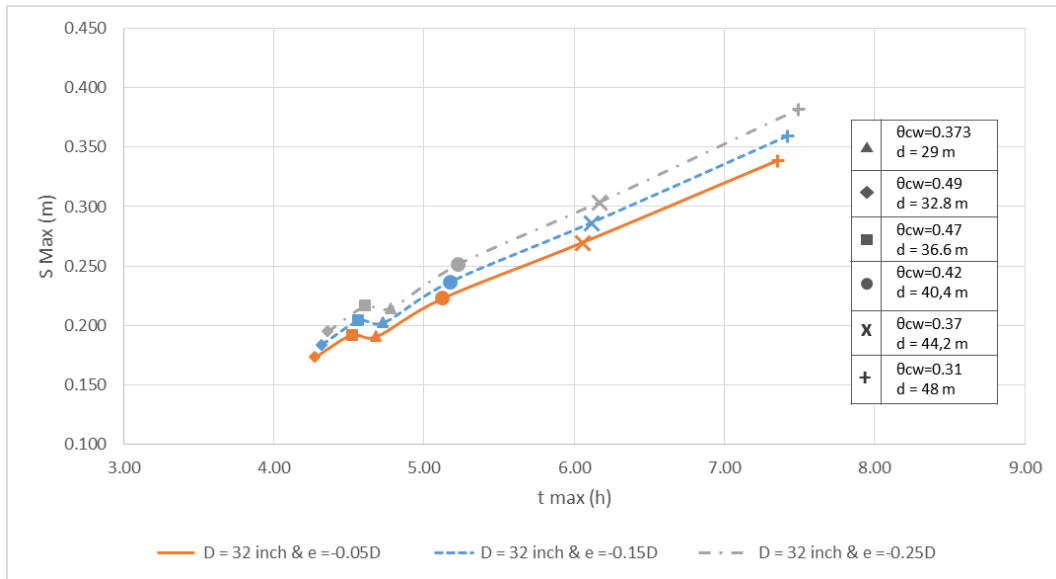
No	d (m)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	$\theta_{cw}$	$T^*$	T (h)	ST (m)	t max (s)	t max (m)	t max (h)	SMax (m)
1	29.00	0.373	0.45	0.07	0.788	0.128	17029	283.82	4.73	0.202
2	32.80	0.420	0.49	0.06	0.731	0.116	15549	259.15	4.32	0.184
3	36.60	0.469	0.47	0.07	0.759	0.129	16437	273.95	4.57	0.204
4	40.40	0.518	0.42	0.07	0.840	0.149	18621	310.35	5.17	0.236
5	44.20	0.568	0.37	0.08	0.962	0.181	21997	366.62	6.11	0.286
6	48.00	0.617	0.31	0.10	1.128	0.228	26721	445.35	7.42	0.360

Waktu propagasi *scouring* pada zona 3 dengan kondisi diameter 32 inchi dan  $e = -0.15D$  adalah seperti ditunjukkan pada tabel dan grafik diatas. Waktu maksimum dengan nilai paling tinggi ada pada kondisi kedalaman 48.00 m dimana nilai  $T = 1.128$  jam dengan  $ST = 0.228$  m dan  $t_{max} = 7.42$  jam dengan  $S_{max} = 0.360$  m. Sementara waktu maksimum paling rendah berada pada kedalaman 32.80 m dimana nilai  $T = 0.731$  jam dengan  $ST = 0.116$  m dan  $t_{max} = 4.32$  jam dengan  $S_{max} = 0.184$  m.

**Tabel 4.32** *Time scale* Zona 3 diameter pipa 32 inchi dengan  $e = -0.25D$ 

No	d (m)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	$\theta_{cw}$	$T^*$	T (h)	ST (m)	t max (s)	t max (m)	t max (h)	SMax (m)
1	29.00	0.373	0.45	0.07	0.788	0.135	17193	286.55	4.78	0.214
2	32.80	0.420	0.49	0.06	0.731	0.123	15701	261.68	4.36	0.195
3	36.60	0.469	0.47	0.07	0.759	0.137	16593	276.55	4.61	0.216
4	40.40	0.518	0.42	0.07	0.840	0.159	18809	313.48	5.22	0.251
5	44.20	0.568	0.37	0.08	0.962	0.192	22205	370.08	6.17	0.304
6	48.00	0.617	0.31	0.10	1.128	0.241	26961	449.35	7.49	0.382

Waktu propagasi *scouring* pada zona 3 dengan kondisi diameter 32 inchi dan  $e = -0.25D$  adalah seperti ditunjukkan pada tabel dan grafik diatas. Waktu maksimum dengan nilai paling tinggi ada pada kondisi kedalaman 48.00 m dimana nilai  $T = 1.128$  jam dengan  $ST = 0.241$  m dan  $t_{max} = 7.49$  jam dengan  $S_{max} = 0.382$  m. Sementara waktu maksimum paling rendah berada pada kedalaman 32.80 m dimana nilai  $T = 0.731$  jam dengan  $ST = 0.123$  m dan  $t_{max} = 4.36$  jam dengan  $S_{max} = 0.195$  m.



**Gambar 4.28** Grafik jangka waktu scouring maksimum di zona 3 dengan  $D = 32$  inch

Pada grafik tersebut merupakan sebuah perbandingan antara nilai  $t_{max}$  dengan kedalaman *scouring* maksimum untuk tiap kedalaman  $e$ . Sebagai contoh, untuk kedalaman  $d = 48.00$  m dan  $e = -0.05 D$  memiliki nilai  $S_{max} = 0.339$  m dan  $t_{max} = 7.35$  jam, untuk kedalaman  $d = 15.50$  m dan  $e = -0.15 D$  memiliki nilai  $S_{max} = 0.360$  m dan  $t_{max} = 7.42$  jam, untuk kedalaman  $d = 15.50$  m dan  $e = -0.25 D$  memiliki nilai  $S_{max} = 0.382$  m dan  $t_{max} = 7.49$  jam. Dari hasil tersebut menunjukkan nilai  $t_{maks}$  untuk nilai  $e = -0.25D$  sedikit lebih lama dibandingkan  $t_{maks}$  untuk nilai  $e = -0.15D$  maupun  $e = -0.05D$ .

Pada zona 3 sebagaimana ditampilkan pada grafik bagaimana proses waktu propagasi *scouring* dimulai dari detik awal hingga mencapai detik *scouring* maksimum. Pada grafik tersebut juga dapat dilihat bahwa slope curam dari grafik adalah nilai skala waktu ( $T$ ) yang merupakan proses *scouring* progresif ( 63.14% dari kedalaman *scouring* maksimum ). Skala waktu dari kedalaman 48.00 m sampai 32.80 m mengalami penurunan dan meningkat kembali pada kedalaman 29.00 m. Kedalaman 48.00 m memiliki waktu paling lama terbentuknya *scouring* maksimum. Sementara pada grafik menunjukkan perbandingan antara nilai waktu maksimum untuk tiap variasi diameter ( $D$ ) dan *embedment* ( $e$ ), pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai  $D$  dan  $e$  yang lebih besar menyebabkan waktu *scouring* sedikit lebih lama.

Hal tersebut sesuai dengan yang ditunjukkan pada hasil penelitian *Fredsoe et.al* (1992).

#### d. Zona 17 – 18

Berikut merupakan hasil perhitungan skala waktu pada zona 17-18 untuk kondisi diameter 32 inchi dan tiga variasi  $e$  ( $e=-0.05D$ ,  $e=-0.15D$  &  $e=-0.25D$ ). Hasil pada kondisi  $D = 30$  inchi dan  $D = 34$  inchi dilampirkan.

**Tabel 4.33** *Time scale* Zona 17 & 18 diameter pipa 32 inchi dengan  $e = -0.05D$

No	d (m)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	$\theta_{cw}$	$T^*$	T (h)	ST (m)	t max (s)	t max (m)	t max (h)	SMax (m)
1	7.00	0.150	0.50	0.14	0.902	0.132	19585	326.42	5.44	0.208
2	8.66	0.183	0.56	0.09	0.800	0.137	17485	291.42	4.86	0.216
3	10.32	0.200	0.56	0.10	0.810	0.134	17641	294.02	4.90	0.212
4	11.98	0.211	0.51	0.12	0.881	0.130	19081	318.02	5.30	0.205
5	13.64	0.219	0.45	0.16	0.997	0.124	21333	355.55	5.93	0.195
6	15.30	0.225	0.39	0.21	1.157	0.118	24657	410.95	6.85	0.186

Waktu propagasi *scouring* pada zona 17 & 18 dengan kondisi diameter 32 inchi dan  $e=-0.05D$  adalah seperti ditunjukkan pada tabel dan grafik diatas. Waktu maksimum dengan nilai paling tinggi ada pada kondisi kedalaman 15.30 m dimana nilai  $T = 2.48$  jam dengan  $ST = 0.128$  m dan  $t_{max} = 14.89$  jam dengan  $S_{max} = 0.203$  m. Sementara waktu maksimum paling rendah berada pada kedalaman 8.66 m dimana nilai  $T = 1.084$  jam dengan  $ST = 0.139$  m dan  $t_{max} = 6.60$  jam dengan  $S_{max} = 0.220$  m.

**Tabel 4.34** *Time scale* Zona 17 & 18 diameter pipa 32 inchi dengan  $e = -0.15D$

No	d (m)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	$\theta_{cw}$	$T^*$	T (h)	ST (m)	t max (s)	t max (m)	t max (h)	SMax (m)
1	7.00	0.150	0.50	0.14	0.902	0.139	19769	329.48	5.49	0.220
2	8.66	0.183	0.56	0.09	0.800	0.145	17653	294.22	4.90	0.229
3	10.32	0.200	0.56	0.10	0.810	0.143	17829	297.15	4.95	0.226
4	11.98	0.211	0.51	0.12	0.881	0.137	19261	321.02	5.35	0.217
5	13.64	0.219	0.45	0.16	0.997	0.131	21621	360.35	6.01	0.208
6	15.30	0.225	0.39	0.21	1.157	0.125	24897	414.95	6.92	0.197

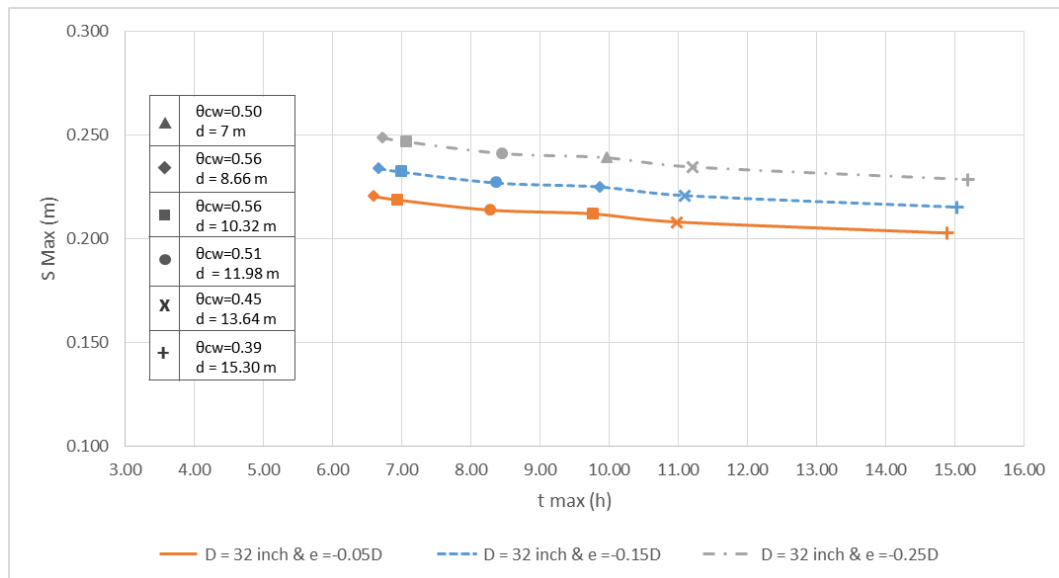


Waktu propagasi *scouring* pada zona 17 & 18 dengan kondisi diameter 32 inci dan  $e=-0.15D$  adalah seperti ditunjukkan pada tabel dan grafik diatas. Waktu maksimum dengan nilai paling tinggi ada pada kondisi kedalaman 15.30. Sementara waktu maksimum paling rendah berada pada kedalaman 8.66 m.

**Tabel 4.35** *Time scale* Zona 17 & 18 diameter pipa 32 inci dengan  $e = -0.25D$

No	d (m)	$\frac{U_c}{U_c+U_w}$	$\theta_{cw}$	$T^*$	T (h)	ST (m)	t max (s)	t max (m)	t max (h)	SMax (m)
1	7.00	0.150	0.50	0.14	0.902	0.148	19969	332.82	5.55	0.234
2	8.66	0.183	0.56	0.09	0.800	0.154	17821	297.02	4.95	0.243
3	10.32	0.200	0.56	0.10	0.810	0.151	17993	299.88	5.00	0.239
4	11.98	0.211	0.51	0.12	0.881	0.146	19461	324.35	5.41	0.231
5	13.64	0.219	0.45	0.16	0.997	0.139	21841	364.02	6.07	0.220
6	15.30	0.225	0.39	0.21	1.157	0.132	25141	419.02	6.98	0.209

Waktu propagasi *scouring* pada zona 17 & 18 dengan kondisi diameter 32 inci dan  $e=-0.25D$  adalah seperti ditunjukkan pada tabel dan grafik diatas. Waktu maksimum dengan nilai paling tinggi ada pada kondisi kedalaman 15.30 m. Sementara waktu maksimum paling rendah berada pada kedalaman 8.66 m.



**Gambar 4.29** Grafik jangka waktu scouring maks. di zona 17-18 dengan D = 32 inch

Pada grafik tersebut merupakan sebuah perbandingan antara nilai  $t_{max}$  dengan kedalaman *scouring* maksimum untuk tiap kedalaman  $e$ . Sebagai contoh, untuk kedalaman  $d = 15.30 \text{ m}$  &  $e = -0.05 D$  memiliki nilai  $S_{max} = 0.212 \text{ m}$  &  $t_{max} = 9.77 \text{ jam}$ , untuk kedalaman  $d = 15.30 \text{ m}$  &  $e = -0.15 D$  memiliki nilai  $S_{max} = 0.215 \text{ m}$  &  $t_{max} = 15.04 \text{ jam}$ , untuk kedalaman  $d = 15.30 \text{ m}$  &  $e = -0.25 D$  memiliki nilai  $S_{max} = 0.229 \text{ m}$  &  $t_{max} = 15.19 \text{ jam}$ . Hasil tersebut menunjukkan  $t_{maks}$  untuk nilai  $e = -0.25D$  sedikit lebih lama dibandingkan  $t_{maks}$  untuk nilai  $e = -0.15D$  &  $e = -0.05D$ .

Pada zona 17 & 18 sebagaimana ditampilkan pada grafik bagaimana proses waktu propagasi *scouring* dimulai dari detik awal hingga mencapai detik *scouring* maksimum. Pada grafik tersebut juga dapat dilihat bahwa slope curam dari grafik adalah nilai skala waktu ( $T$ ) yang merupakan proses *scouring* progresif ( 63.14% dari kedalaman *scouring* maksimum ). Skala waktu dari kedalaman 15.30 m sampai 8.66 m mengalami penurunan dan meningkat kembali pada kedalaman 7.00 m. Kedalaman 15.30 m memiliki waktu paling lama terbentuknya *scouring* maksimum. Sementara pada grafik menunjukkan perbandingan antara nilai waktu maksimum untuk tiap variasi diameter ( $D$ ) dan *embedment* ( $e$ ), pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai  $D$  dan  $e$  yang lebih besar menyebabkan waktu *scouring* sedikit lebih lama. Hal tersebut sesuai dengan yang ditunjukkan pada hasil penelitian *Fredsoe et.al (1992)*.

#### 4.5 Hasil Analisis Laju Propagasi *Scouring* sepanjang pipa

Analisis setelah kedalaman *scouring* maksimum terbentuk ( $S_{max}$ ) seperti yang sudah dilakukan pada sub-bab 4.2 yaitu proses *scouring* ke arah longitudinal (sepanjang pipa). Proses *scouring* ke arah longitudinal nantinya akan membentuk suatu *free span*. Berdasarkan DNV OS-F101 bahwa *free span* yang terbentuk memiliki tingkat keamanan tertentu agar tidak terjadi kegagalan seperti local buckling, fatigue maupun fracture. Oleh sebab itu perhitungan laju propagasi *scouring* arah sepanjang pipa dapat menjadi prosedur perhitungan keamanan pipa.

Model diasumsikan 2D dalam analisis laju propagasi *scouring* sepanjang pipa sesuai dengan yang dilakukan oleh *Sumer dan Fredsoe (2002)* sehingga propagasi sepanjang pipa terjadi setelah kesetimbangan kedalaman *scouring* ( $S_{Max}$ ) tercapai. Pada hasil perhitungan laju propagasi *scouring* menunjukkan bahwa dengan bertambahnya ukuran diameter pipa maupun kedalaman *embedment* menjadikan laju

propagasi *scouring* semakin lambat. Laju *scouring* longitudinal ditentukan oleh properti sedimen, *bed shear stress* ( $\theta_{cw}$ ) pada *flat bed*, kedalaman *embedment* ( $e$ ) pipa, & coefisien  $\alpha$  &  $\beta$ . Menurut Sumer dan Fredsoe (2002) nilai *shear stress amplification* ( $\alpha$ ) menurun seiring dengan bertambahnya *embedment*. Nilai  $\alpha$  didapatkan dengan memasukkannya kedalam grafik sehingga hasilnya adalah untuk  $e = -0.05D$  sebesar  $\alpha = 2$ , untuk  $e = -0.15D$  sebesar  $\alpha = 1.72$  dan untuk  $e = -0.25D$  sebesar  $\alpha = 1.58$ . Sehingga dapat disimpulkan untuk kondisi nilai  $e$  yang lebih besar akan membuat laju propagasi *scouring* semakin lama serta berlaku juga untuk ukuran diameter pipa yang lebih besar akan membuat laju propagasi *scouring* semakin lama. Berikut merupakan tabel hasil perhitungan mengenai laju propagasi *scouring* di zona 1, zona 2, zona 3 dan zona 17 & 18 dengan variasi diameter pipa dan *embedment* . Hasil yang didapatkan telah sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Sumer dan Fredsoe (2002).

#### a. Zona 1

**Tabel 4.36** Laju propagasi *scouring* longitudinal zona 1 dengan  $e = -0.05D$

No	d (m)	$\theta_{cw}$	$\theta_{co}$	D=30inch	D=32inch	D=34inch
				c (m/h)	c (m/h)	c (m/h)
1	6.00	0.08	0.158	0.58	0.54	0.51
2	6.48	0.14	0.288	1.63	1.53	1.44
3	6.96	0.24	0.473	3.62	3.39	3.19
4	7.44	0.34	0.688	6.49	6.09	5.73
5	7.92	0.45	0.899	9.83	9.21	8.67
6	8.40	0.54	1.086	13.13	12.31	11.59

**Tabel 4.37** Laju propagasi *scouring* longitudinal zona 1 dengan  $e = -0.15D$

No	d (m)	$\theta_{cw}$	$\theta_{co}$	D=30inch	D=32inch	D=34inch
				c (m/h)	c (m/h)	c (m/h)
1	6.00	0.08	0.136	0.13	0.12	0.11
2	6.48	0.14	0.248	0.37	0.35	0.32
3	6.96	0.24	0.407	0.82	0.77	0.73
4	7.44	0.34	0.591	1.48	1.39	1.30
5	7.92	0.45	0.773	2.24	2.10	1.98
6	8.40	0.54	0.934	3.00	2.81	2.64

**Tabel 4.38** Laju propagasi *scouring* longitudinal zona 1 dengan  $e = -0.25D$ 

No	d (m)	$\theta_{cw}$	$\theta_{co}$	D=30inch	D=32inch	D=34inch
				c (m/h)	c (m/h)	c (m/h)
1	6.00	0.08	0.125	0.06	0.06	0.05
2	6.48	0.14	0.228	0.17	0.16	0.15
3	6.96	0.24	0.374	0.39	0.36	0.34
4	7.44	0.34	0.543	0.69	0.65	0.61
5	7.92	0.45	0.710	1.05	0.99	0.93
6	8.40	0.54	0.858	1.41	1.32	1.24

Berdasar hasil pada zona 1, laju propagasi tercepat ada pada kedalaman 8.40 m dan berangsur melambat hingga ke kedalaman 6.00 m. Hal ini dikarenakan *shield parameter* pada kedalaman 8.40 m lebih besar sehingga membuktikan semakin besar nilai *shield parameter* menunjukkan bahwa laju propagasi semakin besar. Hasil juga menunjukkan bahwa ukuran diameter dan *embedment* yang lebih besar memiliki nilai laju propagasi yang lebih kecil.

#### b. Zona 2

**Tabel 4.39** Laju propagasi *scouring* longitudinal zona 2 dengan  $e = -0.05D$ 

No	d (m)	$\theta_{cw}$	$\theta_{co}$	D=30inch	D=32inch	D=34inch
				c (m/h)	c (m/h)	c (m/h)
1	10.00	0.46	0.923	10.23	9.59	9.03
2	11.10	0.51	1.019	11.90	11.16	10.50
3	12.20	0.50	0.998	11.53	10.81	10.18
4	13.30	0.46	0.915	10.10	9.47	8.91
5	14.40	0.40	0.809	8.35	7.82	7.36
6	15.50	0.35	0.698	6.64	6.23	5.86

**Tabel 4.40** Laju propagasi *scouring* longitudinal zona 2 dengan  $e = -0.15D$ 

No	d (m)	$\theta_{cw}$	$\theta_{co}$	D=30inch	D=32inch	D=34inch
				c (m/h)	c (m/h)	c (m/h)
1	10.00	0.46	0.794	2.33	2.19	2.06

**Tabel 4.40** (Lanjutan)

No	d (m)	$\theta_{cw}$	$\theta_{co}$	D=30inch	D=32inch	D=34inch
				c (m/h)	c (m/h)	c (m/h)
2	11.10	0.51	0.876	2.72	2.55	2.40
3	12.20	0.50	0.858	2.63	2.47	2.32
4	13.30	0.46	0.787	2.30	2.16	2.03
5	14.40	0.40	0.696	1.90	1.78	1.68
6	15.50	0.35	0.600	1.51	1.42	1.34

**Tabel 4.41** Laju propagasi *scouring* longitudinal zona 2 dengan  $e = -0.25D$ 

No	d (m)	$\theta_{cw}$	$\theta_{co}$	D=30inch	D=32inch	D=34inch
				c (m/h)	c (m/h)	c (m/h)
1	10.00	0.46	0.729	1.10	1.03	0.97
2	11.10	0.51	0.805	1.28	1.20	1.13
3	12.20	0.50	0.789	1.24	1.16	1.09
4	13.30	0.46	0.723	1.08	1.02	0.96
5	14.40	0.40	0.639	0.89	0.84	0.79
6	15.50	0.35	0.551	0.71	0.67	0.63

Berdasar hasil pada zona 2, laju propagasi paling lambat ada pada kedalaman 15.50 m dan berangsur mengalami peningkatan nilai laju propagasi hingga ke kedalaman 11.10 m sementara pada kedalaman 10.00 m kembali mengalami penurunan. Hal ini dikarenakan *shield parameter* yang semakin besar menunjukkan bahwa laju propagasi semakin besar. Hasil juga menunjukkan bahwa ukuran diameter dan *embedment* yang lebih besar memiliki nilai laju propagasi yang lebih kecil.

### c. Zona 3

**Tabel 4.42** Laju propagasi *scouring* longitudinal zona 3 dengan  $e = -0.05D$ 

No	d (m)	$\theta_{cw}$	$\theta_{co}$	D=30inch	D=32inch	D=34inch
				c (m/h)	c (m/h)	c (m/h)
1	29.00	0.45	0.907	9.95	9.33	8.78
2	32.80	0.49	0.979	11.20	10.50	9.88
3	36.60	0.47	0.941	10.53	9.87	9.29

**Tabel 4.42** (Lanjutan)

No	d (m)	$\theta_{cw}$	$\theta_{co}$	D=30inch	D=32inch	D=34inch
				c (m/h)	c (m/h)	c (m/h)
4	40.40	0.42	0.847	8.96	8.40	7.90
5	44.20	0.37	0.736	7.21	6.76	6.36
6	48.00	0.31	0.625	5.59	5.24	4.93

**Tabel 4.43** Laju propagasi *scouring* longitudinal zona 3 dengan  $e = -0.15D$ 

No	d (m)	$\theta_{cw}$	$\theta_{co}$	D=30inch	D=32inch	D=34inch
				c (m/h)	c (m/h)	c (m/h)
1	29.00	0.45	0.780	2.27	2.13	2.00
2	32.80	0.49	0.842	2.56	2.40	2.26
3	36.60	0.47	0.809	2.40	2.25	2.12
4	40.40	0.42	0.728	2.04	1.92	1.80
5	44.20	0.37	0.633	1.64	1.54	1.45
6	48.00	0.31	0.537	1.27	1.19	1.12

**Tabel 4.44** Laju propagasi *scouring* longitudinal zona 3 dengan  $e = -0.25D$ 

No	d (m)	$\theta_{cw}$	$\theta_{co}$	D=30inch	D=32inch	D=34inch
				c (m/h)	c (m/h)	c (m/h)
1	29.00	0.45	0.716	1.07	1.00	0.94
2	32.80	0.49	0.774	1.20	1.13	1.06
3	36.60	0.47	0.809	1.13	1.06	1.00
4	40.40	0.42	0.669	0.96	0.90	0.85
5	44.20	0.37	0.581	0.77	0.72	0.68
6	48.00	0.31	0.493	0.60	0.56	0.53

Berdasar hasil pada zona 3, laju propagasi paling lambat ada pada kedalaman 48.00 m dan berangsur mengalami peningkatan nilai laju propagasi hingga ke kedalaman 32.80 m sementara pada kedalaman 29.00 m kembali mengalami penurunan. Hal ini dikarenakan *shield parameter* yang semakin besar menunjukkan bahwa laju propagasi

semakin besar. Hasil juga menunjukkan bahwa ukuran diameter dan *embedment* yang lebih besar memiliki nilai laju propagasi yang lebih kecil.

**d. Zona 17 – 18**

**Tabel 4.45** Laju propagasi *scouring* longitudinal zona 17 & 18 dengan  $e = -0.05D$

No	d (m)	$\theta_{cw}$	$\theta_{co}$	D=30inch	D=32inch	D=34inch
				c (m/h)	c (m/h)	c (m/h)
1	7.00	0.28	0.562	4.75	4.45	4.19
2	8.66	0.42	0.834	8.75	8.20	7.72
3	10.32	0.40	0.794	8.11	7.61	7.16
4	11.98	0.33	0.663	6.14	5.76	5.42
5	13.64	0.25	0.501	3.96	3.71	3.50
6	15.30	0.18	0.370	2.44	2.29	2.16

**Tabel 4.46** Laju propagasi *scouring* longitudinal zona 17 & 18 dengan  $e = -0.15D$

No	d (m)	$\theta_{cw}$	$\theta_{co}$	D=30inch	D=32inch	D=34inch
				c (m/h)	c (m/h)	c (m/h)
1	7.00	0.28	0.484	1.08	1.01	0.95
2	8.66	0.42	0.717	1.99	1.87	1.76
3	10.32	0.40	0.683	1.85	1.73	1.63
4	11.98	0.33	0.570	1.40	1.31	1.23
5	13.64	0.25	0.431	0.90	0.84	0.79
6	15.30	0.18	0.318	0.55	0.52	0.49

**Tabel 4.47** Laju propagasi *scouring* longitudinal zona 17 & 18 dengan  $e = -0.25D$

No	d (m)	$\theta_{cw}$	$\theta_{co}$	D=30inch	D=32inch	D=34inch
				c (m/h)	c (m/h)	c (m/h)
1	7.00	0.28	0.444	0.51	0.48	0.45
2	8.66	0.42	0.659	0.94	0.88	0.83
3	10.32	0.40	0.627	0.87	0.81	0.77
4	11.98	0.33	0.524	0.66	0.62	0.58
5	13.64	0.25	0.396	0.42	0.40	0.37
6	15.30	0.18	0.318	0.26	0.24	0.23

Berdasar hasil pada zona 17 & 18, laju propagasi paling lambat ada pada kedalaman 15.30 m dan berangsur mengalami peningkatan nilai laju propagasi hingga ke kedalaman 8.66 m sementara pada kedalaman 7.00 m kembali mengalami penurunan. Hal ini dikarenakan *shield parameter* yang semakin besar menunjukkan bahwa laju propagasi semakin besar. Hasil juga menunjukkan bahwa ukuran diameter dan *embedment* yang lebih besar memiliki nilai laju propagasi yang lebih kecil.

Pada hasil yang telah ditunjukkan pada seluruh zona dapat diketahui bahwa *shield parameter* menjadi penentu karakteristik laju. *Shield parameter* merupakan representatif dari tegangan geser dan kecepatan aliran. Sehingga semakin besar nilai *shield parameter* yang berarti tegangan dan kecepatannya juga semakin besar.



## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Dalam analisis dan pembahasan yang telah dilakukan pada bab 4 dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. *Scouring* terjadi akibat tegangan geser pada bawah pipa melebihi tegangan kritisnya sehingga sedimen pada dasar laut secara bertahap tergerus sampai terbentuk kedalaman, lebar maksimum dan dibutuhkan waktu sampai terbentuk kesetimbangan (tidak lagi terjadi penggerusan).
2. Berikut hubungan masing-masing parameter terhadap properti *scouring* :
  - a. Ukuran diameter pipa dan rasio *embedment* yang semakin besar akan mengakibatkan kedalaman *scouring* yang semakin besar dan waktu yang ditempuh untuk mencapai kondisi setimbang (tidak lagi terjadi penggerusan) juga semakin lama.
  - b. Lebar *scouring* dapat diekspresikan melalui nilai KC (Keulegan-Carpenter Number). Ketika nilai KC Number semakin besar maka lebar *scouring* yang terbentuk juga akan semakin besar.
  - c. Ketika nilai shield parameter semakin besar maka waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kedalaman maksimum semakin cepat.
  - d. Untuk kondisi kombinasi arus dan gelombang memiliki fenomena *scouring* yang diekspresikan dari parameter non-dimensional seperti  $U_c/(U_c+U_w)$  dan KC. Ketika nilai  $U_c/(U_c+U_w)$  berada pada rentang 0 – 0.4 maka cenderung mengalami trend penurunan kedalaman *scouring* dari nilai  $U_c/(U_c+U_w)$  0 ke 0.4. Untuk nilai  $U_c/(U_c+U_w)$  yang berada pada rentang 0.4 – 0.7 cenderung mengalami kenaikan kedalaman *scouring* dari nilai  $U_c/(U_c+U_w)$  0.4 ke 0.7. Sementara untuk nilai  $U_c/(U_c+U_w)$  yang berada pada rentang 0.7 – 1 cenderung *steady* nilai kedalaman *scouring* meskipun terjadi kenaikan nilai  $U_c/(U_c+U_w)$  dari 0.7 sampai ke 1. Pengaruh KC juga demikian, kedalaman *scouring* akan berangsur naik seiring meningkatnya nilai KC. Namun perlu dilakukan validasi dengan memasukkan nilai  $U_c/(U_c+U_w)$  dan KC pada grafik yang diberikan oleh *Sumer* dan *Fredsoe*.

3. *Shield parameter* memiliki peran penting dalam menentukan laju propagasi *scouring* dimana semakin besar nilai *shield parameter* maka laju propagasi *scouring* longitudinal akan semakin cepat.
4. Laju propagasi *scouring* mengalami penurunan nilai atau perlambatan seiring dengan bertambahnya ukuran diameter maupun rasio *embedment*.

## 5.2 Saran

Berikut merupakan saran untuk penelitian yang berkaitan mengenai *scouring* pada pipa :

1. Dilakukan sebuah penelitian laboratorium untuk kondisi *in-trench* dengan pengaruh kombinasi arus dan gelombang karena publikasi mengenai hal tersebut masih jarang. Pemodelan kedalaman *in-trench* yang diteliti berkisar 1% dari diameter hingga 25% sehingga masih bisa dikembangkan untuk mengetahui bagaimana fenomena yang terjadi bila kedalaman *in-trench* lebih dari 25% dari diameter pipa.
2. Dilakukan perhitungan free span yang diizinkan dan dihubungkan dengan pembentukan *scouring*.
3. Pemodelan *scouring* pada kondisi *shoaling* masih jarang dilakukan sehingga masih perlu dilakukan penelitian khusus mengenai hal tersebut.
4. Perlu dilakukan pemodelan fisik laju propagasi *scouring* longitudinal terutama dengan kondisi kombinasi arus dan gelombang karena masih sedikit peneliti yang melakukannya.
5. Dilakukan pemodelan analisis mengenai fenomena *scouring* setelah kedalaman maksimum terjadi ( *equilibrium stage of scouring* ) karena terdapat fase selanjutnya ketika kedalaman maksimum terbentuk.
6. Dilakukan analisis yang melibatkan efek lain seperti vibrasi, armor pada pipa seperti helical rod, multiple pipe, sudut datang arus dan gelombang hingga cohesive sedimen yang menjadi seabed.
7. Melakukan analisis dengan menghubungkan fenomena *scouring* terhadap kegagalan pipa seperti *local buckling*, *fatigue*, ataupun *fracture* sehingga didapatkan satu analisis yang komprehensif dan lengkap sesuai kondisi lapangan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Budiarti, L. 2016. *Pemodelan Numerik Profil 2D Scouring Pada Pipa Bawah Laut Dengan Variasi Jarak Clearance Terhadap Dasar Laut*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, FTK-ITS.Surabaya.
- Cheng, L., Yeow, K., Zhang, Z., and Fangjun, L. 2014. 3D Scour Below Pipelines Under Waves And Combined Waves And Currents. *Coastal Engineering*. (83) : 137-149.
- Camenen, B., and Larson, M. 2004. A General Formula For Non-Cohesive Bed Load Sediment Transport. *Estuarine, Coastal And Shelf Science* 63 (2005) 249-260 DOI : 10.1016/j.ecss.2004.10.019.
- Chiew, Y. M. 1997. Prediction Of Maximum Scour Depth at Submarine Pipelines. *J. Hydraulic Engineering. ASCE*, Vol. 117, No. 4, 452-466.
- CERC. 1984. *Shore Protection Manual*. US Army Coastal Engineering Research Center. Washington
- De Sonnevile, B, Rudolph, D., and Raaijmakers, T.C. 2008. Scour Reduction by Collars Around Offsjore Monopiles. *Proceeding ICSE*, Vol. 5, No. 05, 460-470.
- Dewan Energi Nasional. 2014. *Outlook Energi Indonesia*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Jakarta.
- DNV-OS-F101. 2012. *Submarine Pipeline System*. Det Norske Veritas AS.
- DNV-RP-F109. 2012. *On Bottom Stability Design of Submarine Pipelines*. Det Norske Veritas AS.
- Dogan, M and Arisoy, Y. 2015. Scour Regime Effects on the Time scale Of Wave Below Submerged Pipes. *Ocean Engineering*. (104) : 673-679.

- Etemad-Shahidi, A., Yasa, R., and Kazeminezhad, M. H. 2010. Prediction of wave-induced scour depth under submarine pipelines using machine learning approach. *Applied Ocean Research* (2010). doi:10.1016/j.apor.2010.11.002
- Kiziloz, B., Cevik, E., and Yuksel, Y. 2013. Scour Below Submarine Pipelines Under Irregular Wave Attack. *Coastal Engineering*. (79) : 1-8.
- Kjeldsen, S. P., Gjorvik, O., Bringager, K. G. And Jacobsen, J. 1973. Local Scour Near Offshore Pipelines. *Second International Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*, Conf. Reykjavik, 308-331.
- Leeuwenstein, W., Bijker, E. A., Peerbolte, E.B. and Wind, H. G. 1985. The Natural Self-Burial Of Submarine Pipelines. *Proc. 4th International Conf. on Behavior Of Offshore Structures (BOSS)*, Elsevier Science Publishers, vol. 2, 717-728.
- Mao, Y. 1986. *The Interaction Between A Pipeline And An Erodible Bed*. Series Paper 39, Tech. Univ. Of Denmark, ISVA, in partial fulfillment of the requirement for the degree of Ph.D.
- MCCormick, M. 2009. *Ocean Engineering Mechanics With Applications*. Cambridge University Press : New York.
- Minanti, P. 2016. *Analisa Scouring Pada Pipa Bawah Laut Kondisi In-Trench Dan Pengembangan Perangkat Lunak Untuk Pemodelan Matematis Dengan Variasi Diameter Pipa*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, FTK-ITS.Surabaya.
- Mouselli, A. H. 1981. *Offshore Pipeline Design Analysis and Methods*. Penwell Book. Oklahoma.
- Nugraha, M. Catur. 2012. *Analisis Pengaruh Scouring pada Pipa Bawah Laut (Studi Kasus Pipa Gas Transmisi SSWJ Jalur Pipa Gas Labuhan Maringgai-Muara Bekasi*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, FTK-ITS.Surabaya.

- Nugroho, A. 2011. *Analisa Scouring Pipa Bawah Laut Kodeco Jalur Poleng-Gresik Dengan Variasi Tipe Tanah*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, FTK-ITS. Surabaya.
- Sasongko, S. 2010. *Metode Numerik dengan Scilab*. Andi Yogyakarta.
- Sumer, B.M, dan Jorgen, F. 2002. *The Mechanics Of Scour In The Marine Environment*. World Scientific : Denmark.
- Suntoyo. 2014. *Modul Ajar : Mekanika dan Teknologi Transportasi Sedimen*. Surabaya
- Terzagi, K. 1948. *Theoritical Soil Mechanics*. London: Chapman and Hall, John Willey And Sons, inc., NY
- Triatmodjo, B. 1999. *Teknik Pantai*. Beta Offset : Yogyakarta.
- Hsu, H.T. 1984. *Applied Offshore Structural Engineering*. Gulf Publishing Company Book Division : Houston, Texas.
- Yang, B., Yang, T., Ma, J.L., and Cui, J.S. 2013. The Experimental Study on Local Scour Around a Circular Pipe Undergoing Vortex-Induced Vibration in Steady Flow. *Journal of marine Science and Technology Vol. 21 No. 3* : 250-257.
- Westerhorstmann, J.H. 1988. *The Effect of Pipe Spacing on Marine Pipeline Scour*. Thesis. Master of Science Ocean Engineering. Texas A&M University.
- Yasa, R. 2011. Prediction of the Scour Depth under Submarine Pipelines-in Wave Condition. *Journal of Coastal Research ICS2011 (Proceedings)* (64) : 627-630.

# **LAMPIRAN A**

Tabel Kedalaman Scouring Zona 2, Zona 3 & Zona 17-18

**Tabel Lampiran *Scouring* maksimum Zona 2 dengan D = 30 inci (0.762 m)**

No	d (m)	Uw dasar (m/s)	Uc (m/s)	$\frac{Uc}{Uc+Uw}$	KC	e=-0.05D		e=-0.15D		e=-0.25D	
						S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D
1	10.00	1.013	0.500	0.330	10.92	0.229	0.301	0.244	0.320	0.259	0.339
2	11.10	1.033	0.500	0.326	11.13	0.231	0.304	0.246	0.322	0.261	0.342
3	12.20	1.022	0.500	0.328	11.01	0.230	0.302	0.245	0.321	0.260	0.341
4	13.30	0.994	0.500	0.335	10.71	0.227	0.299	0.242	0.317	0.256	0.337
5	14.40	0.958	0.500	0.343	10.33	0.224	0.294	0.238	0.312	0.252	0.331
6	15.50	0.918	0.500	0.353	9.89	0.220	0.289	0.234	0.307	0.248	0.325

**Tabel Lampiran *Scouring* maksimum Zona 2 dengan D = 32 inci (0.813 m)**

No	d (m)	Uw dasar (m/s)	Uc (m/s)	$\frac{Uc}{Uc+Uw}$	KC	e=-0.05D		e=-0.15D		e=-0.25D	
						S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D
1	10.00	1.013	0.500	0.330	10.23	0.236	0.290	0.251	0.308	0.266	0.328
2	11.10	1.033	0.500	0.326	10.44	0.238	0.293	0.253	0.311	0.269	0.330
3	12.20	1.022	0.500	0.328	10.33	0.237	0.292	0.252	0.310	0.267	0.329
4	13.30	0.994	0.500	0.335	10.04	0.234	0.288	0.249	0.306	0.264	0.325
5	14.40	0.958	0.500	0.343	9.68	0.231	0.284	0.245	0.301	0.260	0.320
6	15.50	0.918	0.500	0.353	9.27	0.226	0.279	0.240	0.296	0.255	0.314

**Tabel Lampiran *Scouring* maksimum Zona 2 dengan D = 34 inci (0.864 m)**

No	d (m)	Uw dasar (m/s)	Uc (m/s)	$\frac{Uc}{Uc+Uw}$	KC	e=-0.05D		e=-0.15D		e=-0.25D	
						S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D
1	10.00	1.013	0.50	0.330	9.63	0.243	0.281	0.258	0.298	0.274	0.317
2	11.10	1.033	0.50	0.326	9.82	0.245	0.283	0.260	0.301	0.276	0.320
3	12.20	1.022	0.50	0.328	9.72	0.244	0.282	0.259	0.300	0.275	0.318
4	13.30	0.994	0.50	0.335	9.45	0.241	0.279	0.256	0.296	0.271	0.314
5	14.40	0.958	0.50	0.343	9.11	0.237	0.274	0.252	0.291	0.267	0.309
6	15.50	0.918	0.50	0.353	8.73	0.233	0.270	0.247	0.286	0.262	0.304

**Tabel Lampiran *Scouring* maksimum Zona 3 dengan D 30 inchi (0.762 m)**

No	d (m)	Uw dasar (m/s)	Uc (m/s)	$\frac{Uc}{Uc+Uw}$	KC	e=-0.05D		e=-0.15D		e=-0.25D	
						S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D
1	29.00	0.62	0.37	0.373	6.99	0.185	0.242	0.196	0.257	0.208	0.273
2	32.80	0.51	0.37	0.420	5.74	0.168	0.221	0.178	0.234	0.189	0.249
3	36.60	0.42	0.37	0.469	4.71	0.185	0.243	0.197	0.258	0.209	0.274
4	40.40	0.34	0.37	0.518	3.86	0.214	0.280	0.227	0.298	0.241	0.316
5	44.20	0.28	0.37	0.568	3.16	0.257	0.337	0.273	0.358	0.290	0.380
6	48.00	0.23	0.37	0.617	2.58	0.321	0.421	0.340	0.447	0.362	0.474

**Tabel Lampiran *Scouring* maksimum Zona 3 dengan D = 32 inchi (0.813 m)**

No	d (m)	Uw dasar (m/s)	Uc (m/s)	$\frac{Uc}{Uc+Uw}$	KC	e=-0.05D		e=-0.15D		e=-0.25D	
						S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D
1	29.00	0.62	0.37	0.373	6.55	0.190	0.234	0.202	0.249	0.214	0.264
2	32.80	0.51	0.37	0.420	5.38	0.173	0.213	0.184	0.226	0.195	0.240
3	36.60	0.42	0.37	0.469	4.42	0.192	0.236	0.204	0.251	0.216	0.266
4	40.40	0.34	0.37	0.518	3.62	0.223	0.274	0.236	0.291	0.251	0.309
5	44.20	0.28	0.37	0.568	2.96	0.270	0.332	0.286	0.352	0.304	0.374
6	48.00	0.23	0.37	0.617	2.42	0.339	0.417	0.360	0.443	0.382	0.470

**Tabel Lampiran *Scouring* maksimum Zona 3 dengan D = 34 inchi (0.864 m)**

No	d (m)	Uw dasar (m/s)	Uc (m/s)	$\frac{Uc}{Uc+Uw}$	KC	e=-0.05D		e=-0.15D		e=-0.25D	
						S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D
1	29.00	0.62	0.37	0.373	6.17	0.196	0.226	0.208	0.240	0.220	0.255
2	32.80	0.51	0.37	0.420	5.06	0.178	0.206	0.188	0.218	0.200	0.232
3	36.60	0.42	0.37	0.469	4.16	0.198	0.230	0.210	0.244	0.224	0.259
4	40.40	0.34	0.37	0.518	3.41	0.232	0.268	0.246	0.285	0.261	0.302
5	44.20	0.28	0.37	0.568	2.79	0.282	0.327	0.300	0.347	0.318	0.369
6	48.00	0.23	0.37	0.617	2.28	0.357	0.413	0.379	0.439	0.403	0.466



**Tabel Lampiran *Scouring* maksimum Zona 17-18 dengan D = 30 inchi (0.762 m)**

No	d (m)	Uw dasar (m/s)	Uc (m/s)	$\frac{Uc}{Uc+Uw}$	KC	e=-0.05D		e=-0.15D		e=-0.25D	
						S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D
1	7.00	0.86	0.52	0.150	8.47	0.206	0.270	0.218	0.287	0.232	0.304
2	8.66	0.95	0.52	0.183	9.39	0.214	0.281	0.227	0.298	0.241	0.316
3	10.32	0.93	0.52	0.200	9.22	0.212	0.279	0.225	0.296	0.239	0.314
4	11.98	0.88	0.52	0.211	8.67	0.207	0.272	0.220	0.289	0.234	0.307
5	13.64	0.81	0.52	0.219	8.01	0.202	0.265	0.214	0.281	0.228	0.299
6	15.30	0.74	0.38	0.225	7.32	0.197	0.258	0.209	0.274	0.222	0.291

**Tabel Lampiran *Scouring* maksimum Zona 17-18 dengan D = 32 inchi (0.813 m)**

No	d (m)	Uw dasar (m/s)	Uc (m/s)	$\frac{Uc}{Uc+Uw}$	KC	e=-0.05D		e=-0.15D		e=-0.25D	
						S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D
1	7.00	0.86	0.52	0.150	7.94	0.212	0.261	0.225	0.277	0.239	0.294
2	8.66	0.95	0.52	0.183	8.80	0.220	0.271	0.234	0.288	0.248	0.305
3	10.32	0.93	0.52	0.200	8.64	0.219	0.269	0.232	0.286	0.246	0.303
4	11.98	0.88	0.52	0.211	8.13	0.214	0.263	0.227	0.279	0.241	0.296
5	13.64	0.81	0.52	0.219	7.51	0.208	0.256	0.221	0.272	0.235	0.289
6	15.30	0.74	0.38	0.225	6.87	0.203	0.249	0.215	0.265	0.229	0.281

**Tabel Lampiran *Scouring* maksimum Zona 17-18 dengan D = 34 inchi (0.864 m)**

No	d (m)	Uw dasar (m/s)	Uc (m/s)	$\frac{Uc}{Uc+Uw}$	KC	e=-0.05D		e=-0.15D		e=-0.25D	
						S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D	S Max (m)	S/D
1	7.00	0.86	0.52	0.150	7.47	0.218	0.252	0.231	0.268	0.246	0.284
2	8.66	0.95	0.52	0.183	8.28	0.226	0.262	0.240	0.278	0.255	0.296
3	10.32	0.93	0.52	0.200	8.13	0.225	0.260	0.239	0.276	0.253	0.293
4	11.98	0.88	0.52	0.211	7.65	0.220	0.254	0.233	0.270	0.248	0.287
5	13.64	0.81	0.52	0.219	7.06	0.214	0.248	0.227	0.263	0.241	0.279
6	15.30	0.74	0.38	0.225	6.46	0.208	0.241	0.221	0.256	0.235	0.272

# **LAMPIRAN B**

Propagasi Scouring Zona 1 Kondisi Diameter 32 inch

**Tabel propagasi *scouring* zona 1 diameter 32 inch dan embedment -0.05D**

t (s)	St	St	St	St	St	St
	d=6.00m	d=6.48m	d=6.96m	d=7.44m	d=7.92m	d=8.40m
26969	0.439	0.338	0.305	0.292	0.285	0.281
26973	0.439	0.338	0.305	0.292	0.285	0.281
26977	0.439	0.338	0.305	0.292	0.285	0.281
26981	0.439	0.338	0.305	0.292	0.285	0.281
26985	0.439	0.338	0.305	0.292	0.285	0.281
26989	0.439	0.338	0.305	0.292	0.285	0.281
32409	0.465	0.354	0.312	0.295	0.286	0.281
32413	0.465	0.354	0.312	0.295	0.286	0.281
32417	0.465	0.354	0.312	0.295	0.286	0.281
32421	0.465	0.354	0.312	0.295	0.286	0.281
32425	0.465	0.354	0.312	0.295	0.286	0.281
32429	0.465	0.354	0.312	0.295	0.286	0.281
41737	0.492	0.369	0.318	0.297	0.286	0.281
41741	0.492	0.369	0.318	0.297	0.286	0.281
41745	0.492	0.369	0.318	0.297	0.286	0.281
41749	0.492	0.369	0.318	0.297	0.286	0.281
41753	0.492	0.369	0.318	0.297	0.286	0.281
41757	0.492	0.369	0.318	0.297	0.286	0.281
57845	0.513	0.378	0.321	0.297	0.286	0.281
57849	0.513	0.378	0.321	0.297	0.286	0.281
57853	0.513	0.378	0.321	0.297	0.286	0.281
57857	0.513	0.378	0.321	0.297	0.286	0.281
57861	0.513	0.378	0.321	0.297	0.286	0.281
57865	0.513	0.378	0.321	0.297	0.286	0.281
82645	0.521	0.382	0.321	0.297	0.286	0.281
82649	0.521	0.382	0.321	0.297	0.286	0.281
82653	0.521	0.382	0.321	0.297	0.286	0.281
82657	0.521	0.382	0.321	0.297	0.286	0.281
82661	0.521	0.382	0.321	0.297	0.286	0.281
82665	0.521	0.382	0.321	0.297	0.286	0.281
82669	0.521	0.382	0.321	0.297	0.286	0.281
102329	0.523	0.382	0.321	0.297	0.286	0.281
102333	0.523	0.382	0.321	0.297	0.286	0.281
102337	0.523	0.382	0.321	0.297	0.286	0.281
102341	0.523	0.382	0.321	0.297	0.286	0.281
102345	0.523	0.382	0.321	0.297	0.286	0.281
102349	0.523	0.382	0.321	0.297	0.286	0.281
102353	0.523	0.382	0.321	0.297	0.286	0.281
102357	0.523	0.382	0.321	0.297	0.286	0.281
102361	0.523	0.382	0.321	0.297	0.286	0.281
102365	0.523	0.382	0.321	0.297	0.286	0.281

**Tabel propagasi *scouring* zona 1 diameter 32 inch dan embedment -0.15D**

t (s)	St	St	St	St	St	St
	d=6.00m	d=6.48m	d=6.96m	d=7.44m	d=7.92m	d=8.40m
27221	0.469	0.360	0.325	0.310	0.303	0.298
27225	0.469	0.360	0.325	0.310	0.303	0.298
27229	0.469	0.360	0.325	0.310	0.303	0.298
27233	0.469	0.360	0.325	0.310	0.303	0.298
27237	0.469	0.360	0.325	0.310	0.303	0.298
32721	0.496	0.377	0.332	0.313	0.304	0.298
32725	0.496	0.377	0.332	0.313	0.304	0.298
32729	0.496	0.377	0.332	0.313	0.304	0.298
32733	0.496	0.377	0.332	0.313	0.304	0.298
32737	0.496	0.377	0.332	0.313	0.304	0.298
32741	0.496	0.377	0.332	0.313	0.304	0.298
42121	0.524	0.392	0.338	0.315	0.304	0.298
42125	0.524	0.392	0.338	0.315	0.304	0.298
42129	0.524	0.392	0.338	0.315	0.304	0.298
42133	0.524	0.392	0.338	0.315	0.304	0.298
42137	0.524	0.392	0.338	0.315	0.304	0.298
42141	0.524	0.392	0.338	0.315	0.304	0.298
42145	0.524	0.392	0.338	0.315	0.304	0.298
58389	0.545	0.402	0.341	0.315	0.304	0.298
58393	0.545	0.402	0.341	0.315	0.304	0.298
58397	0.545	0.402	0.341	0.315	0.304	0.298
58401	0.545	0.402	0.341	0.315	0.304	0.298
58405	0.545	0.402	0.341	0.315	0.304	0.298
58409	0.545	0.402	0.341	0.315	0.304	0.298
58413	0.545	0.402	0.341	0.315	0.304	0.298
83405	0.554	0.406	0.341	0.315	0.304	0.298
83409	0.554	0.406	0.341	0.315	0.304	0.298
83413	0.554	0.406	0.341	0.315	0.304	0.298
83417	0.554	0.406	0.341	0.315	0.304	0.298
83421	0.554	0.406	0.341	0.315	0.304	0.298
83425	0.554	0.406	0.341	0.315	0.304	0.298
83429	0.554	0.406	0.341	0.315	0.304	0.298
83433	0.554	0.406	0.341	0.315	0.304	0.298
83437	0.554	0.406	0.341	0.315	0.304	0.298
103229	0.556	0.406	0.341	0.315	0.304	0.298
103233	0.556	0.406	0.341	0.315	0.304	0.298
103237	0.556	0.406	0.341	0.315	0.304	0.298
103241	0.556	0.406	0.341	0.315	0.304	0.298
103245	0.556	0.406	0.341	0.315	0.304	0.298
103249	0.556	0.406	0.341	0.315	0.304	0.298
103253	0.556	0.406	0.341	0.315	0.304	0.298

**Tabel propagasi *scouring* zona 1 diameter 32 inch dan embedment -0.25D**

t (s)	St	St	St	St	St	St
	d=6.00m	d=6.48m	d=6.96m	d=7.44m	d=7.92m	d=8.40m
27469	0.499	0.384	0.345	0.330	0.321	0.316
27473	0.499	0.384	0.345	0.330	0.321	0.316
27477	0.499	0.384	0.345	0.330	0.321	0.316
27481	0.499	0.384	0.345	0.330	0.321	0.316
27485	0.499	0.384	0.345	0.330	0.321	0.316
27489	0.499	0.384	0.345	0.330	0.321	0.316
27493	0.499	0.384	0.345	0.330	0.321	0.316
33013	0.527	0.401	0.353	0.333	0.322	0.316
33017	0.527	0.401	0.353	0.333	0.322	0.316
33021	0.527	0.401	0.353	0.333	0.322	0.316
33025	0.527	0.401	0.353	0.333	0.322	0.316
33029	0.527	0.401	0.353	0.333	0.322	0.316
42525	0.557	0.417	0.359	0.335	0.322	0.316
42529	0.557	0.417	0.359	0.335	0.322	0.316
42533	0.557	0.417	0.359	0.335	0.322	0.316
42537	0.557	0.417	0.359	0.335	0.322	0.316
42541	0.557	0.417	0.359	0.335	0.322	0.316
58921	0.579	0.427	0.362	0.335	0.322	0.316
58925	0.579	0.427	0.362	0.335	0.322	0.316
58929	0.579	0.427	0.362	0.335	0.322	0.316
58933	0.579	0.427	0.362	0.335	0.322	0.316
58937	0.579	0.427	0.362	0.335	0.322	0.316
58941	0.579	0.427	0.362	0.335	0.322	0.316
58945	0.579	0.427	0.362	0.335	0.322	0.316
84149	0.588	0.431	0.362	0.335	0.322	0.316
84153	0.588	0.431	0.362	0.335	0.322	0.316
84157	0.588	0.431	0.362	0.335	0.322	0.316
84161	0.588	0.431	0.362	0.335	0.322	0.316
84165	0.588	0.431	0.362	0.335	0.322	0.316
84169	0.588	0.431	0.362	0.335	0.322	0.316
84173	0.588	0.431	0.362	0.335	0.322	0.316
84177	0.588	0.431	0.362	0.335	0.322	0.316
84181	0.588	0.431	0.362	0.335	0.322	0.316
104101	0.590	0.431	0.362	0.335	0.322	0.316
104105	0.590	0.431	0.362	0.335	0.322	0.316
104109	0.590	0.431	0.362	0.335	0.322	0.316
104113	0.590	0.431	0.362	0.335	0.322	0.316
104117	0.590	0.431	0.362	0.335	0.322	0.316
104121	0.590	0.431	0.362	0.335	0.322	0.316
104125	0.590	0.431	0.362	0.335	0.322	0.316
104129	0.590	0.431	0.362	0.335	0.322	0.316



# **LAMPIRAN C**

Propagasi Scouring Zona 2 Kondisi Diameter 32 Inch

**Tabel propagasi *scouring* zona 2 diameter 32 inch dan embedment -0.05D**

t (s)	St	St	St	St	St	St
	d=10.00m	d=11.10m	d=12.20m	d=13.30m	d=14.40m	d=15.50m
18837	0.235	0.238	0.236	0.233	0.229	0.223
18841	0.235	0.238	0.236	0.233	0.229	0.223
18845	0.235	0.238	0.236	0.233	0.229	0.223
18849	0.235	0.238	0.236	0.233	0.229	0.223
18853	0.235	0.238	0.236	0.233	0.229	0.223
18857	0.235	0.238	0.236	0.233	0.229	0.223
18861	0.235	0.238	0.236	0.233	0.229	0.223
19237	0.235	0.238	0.237	0.233	0.229	0.223
19241	0.235	0.238	0.237	0.233	0.229	0.223
19245	0.235	0.238	0.237	0.233	0.229	0.223
19249	0.235	0.238	0.237	0.233	0.229	0.223
19253	0.235	0.238	0.237	0.233	0.229	0.223
19257	0.235	0.238	0.237	0.233	0.229	0.223
20729	0.236	0.238	0.237	0.233	0.230	0.224
20733	0.236	0.238	0.237	0.233	0.230	0.224
20737	0.236	0.238	0.237	0.233	0.230	0.224
20741	0.236	0.238	0.237	0.233	0.230	0.224
20745	0.236	0.238	0.237	0.233	0.230	0.224
20749	0.236	0.238	0.237	0.233	0.230	0.224
20753	0.236	0.238	0.237	0.233	0.230	0.224
20757	0.236	0.238	0.237	0.233	0.230	0.224
20957	0.236	0.238	0.237	0.234	0.230	0.224
20961	0.236	0.238	0.237	0.234	0.230	0.224
20965	0.236	0.238	0.237	0.234	0.230	0.224
20969	0.236	0.238	0.237	0.234	0.230	0.224
20973	0.236	0.238	0.237	0.234	0.230	0.224
20977	0.236	0.238	0.237	0.234	0.230	0.224
20981	0.236	0.238	0.237	0.234	0.230	0.224
20985	0.236	0.238	0.237	0.234	0.230	0.224
23685	0.236	0.238	0.237	0.234	0.231	0.225
23689	0.236	0.238	0.237	0.234	0.231	0.225
23693	0.236	0.238	0.237	0.234	0.231	0.225
23697	0.236	0.238	0.237	0.234	0.231	0.225
23701	0.236	0.238	0.237	0.234	0.231	0.225
23705	0.236	0.238	0.237	0.234	0.231	0.225
23709	0.236	0.238	0.237	0.234	0.231	0.225
27393	0.236	0.238	0.237	0.234	0.231	0.226
27397	0.236	0.238	0.237	0.234	0.231	0.226
27401	0.236	0.238	0.237	0.234	0.231	0.226
27405	0.236	0.238	0.237	0.234	0.231	0.226
27409	0.236	0.238	0.237	0.234	0.231	0.226



**Tabel propagasi *scouring* zona 2 diameter 32 inch dan embedment -0.15D**

t (s)	St	St	St	St	St	St
	d=10.00m	d=11.10m	d=12.20m	d=13.30m	d=14.40m	d=15.50m
19021	0.250	0.253	0.251	0.248	0.243	0.237
19025	0.250	0.253	0.251	0.248	0.243	0.237
19029	0.250	0.253	0.251	0.248	0.243	0.237
19033	0.250	0.253	0.251	0.248	0.243	0.237
19037	0.250	0.253	0.251	0.248	0.243	0.237
19041	0.250	0.253	0.251	0.248	0.243	0.237
19045	0.250	0.253	0.251	0.248	0.243	0.237
19429	0.250	0.253	0.252	0.248	0.243	0.237
19433	0.250	0.253	0.252	0.248	0.243	0.237
19437	0.250	0.253	0.252	0.248	0.243	0.237
19441	0.250	0.253	0.252	0.248	0.243	0.237
19445	0.250	0.253	0.252	0.248	0.243	0.237
19449	0.250	0.253	0.252	0.248	0.243	0.237
19453	0.250	0.253	0.252	0.248	0.243	0.237
20937	0.251	0.253	0.252	0.248	0.244	0.238
20941	0.251	0.253	0.252	0.248	0.244	0.238
20945	0.251	0.253	0.252	0.248	0.244	0.238
20949	0.251	0.253	0.252	0.248	0.244	0.238
20953	0.251	0.253	0.252	0.248	0.244	0.238
20957	0.251	0.253	0.252	0.248	0.244	0.238
20961	0.251	0.253	0.252	0.248	0.244	0.238
21165	0.251	0.253	0.252	0.249	0.244	0.238
21169	0.251	0.253	0.252	0.249	0.244	0.238
21173	0.251	0.253	0.252	0.249	0.244	0.238
21177	0.251	0.253	0.252	0.249	0.244	0.238
21181	0.251	0.253	0.252	0.249	0.244	0.238
21185	0.251	0.253	0.252	0.249	0.244	0.238
21189	0.251	0.253	0.252	0.249	0.244	0.238
23913	0.251	0.253	0.252	0.249	0.245	0.239
23917	0.251	0.253	0.252	0.249	0.245	0.239
23921	0.251	0.253	0.252	0.249	0.245	0.239
23925	0.251	0.253	0.252	0.249	0.245	0.239
23929	0.251	0.253	0.252	0.249	0.245	0.239
23933	0.251	0.253	0.252	0.249	0.245	0.239
27665	0.251	0.253	0.252	0.249	0.245	0.240
27669	0.251	0.253	0.252	0.249	0.245	0.240
27673	0.251	0.253	0.252	0.249	0.245	0.240
27677	0.251	0.253	0.252	0.249	0.245	0.240
27681	0.251	0.253	0.252	0.249	0.245	0.240
27685	0.251	0.253	0.252	0.249	0.245	0.240
27689	0.251	0.253	0.252	0.249	0.245	0.240

**Tabel propagasi *scouring* zona 2 diameter 32 inch dan embedment -0.25D**

t (s)	St	St	St	St	St	St
	d=10.00m	d=11.10m	d=12.20m	d=13.30m	d=14.40m	d=15.50m
19209	0.265	0.269	0.266	0.263	0.258	0.251
19213	0.265	0.269	0.266	0.263	0.258	0.251
19217	0.265	0.269	0.266	0.263	0.258	0.252
19221	0.265	0.269	0.266	0.263	0.258	0.252
19225	0.265	0.269	0.266	0.263	0.258	0.252
19229	0.265	0.269	0.266	0.263	0.258	0.252
19233	0.265	0.269	0.266	0.263	0.258	0.252
19609	0.265	0.269	0.267	0.263	0.258	0.252
19613	0.265	0.269	0.267	0.263	0.258	0.252
19617	0.265	0.269	0.267	0.263	0.258	0.252
19621	0.265	0.269	0.267	0.263	0.258	0.252
19625	0.265	0.269	0.267	0.263	0.258	0.252
19629	0.265	0.269	0.267	0.263	0.258	0.252
21129	0.266	0.269	0.267	0.263	0.259	0.253
21133	0.266	0.269	0.267	0.263	0.259	0.253
21137	0.266	0.269	0.267	0.263	0.259	0.253
21141	0.266	0.269	0.267	0.263	0.259	0.253
21145	0.266	0.269	0.267	0.263	0.259	0.253
21149	0.266	0.269	0.267	0.263	0.259	0.253
21153	0.266	0.269	0.267	0.263	0.259	0.253
21157	0.266	0.269	0.267	0.263	0.259	0.253
21365	0.266	0.269	0.267	0.264	0.259	0.253
21369	0.266	0.269	0.267	0.264	0.259	0.253
21373	0.266	0.269	0.267	0.264	0.259	0.253
21377	0.266	0.269	0.267	0.264	0.259	0.253
21381	0.266	0.269	0.267	0.264	0.259	0.253
21385	0.266	0.269	0.267	0.264	0.259	0.253
24141	0.266	0.269	0.267	0.264	0.260	0.254
24145	0.266	0.269	0.267	0.264	0.260	0.254
24149	0.266	0.269	0.267	0.264	0.260	0.254
24153	0.266	0.269	0.267	0.264	0.260	0.254
24157	0.266	0.269	0.267	0.264	0.260	0.254
24161	0.266	0.269	0.267	0.264	0.260	0.254
24165	0.266	0.269	0.267	0.264	0.260	0.254
27937	0.266	0.269	0.267	0.264	0.260	0.255
27941	0.266	0.269	0.267	0.264	0.260	0.255
27945	0.266	0.269	0.267	0.264	0.260	0.255
27949	0.266	0.269	0.267	0.264	0.260	0.255
27953	0.266	0.269	0.267	0.264	0.260	0.255
27957	0.266	0.269	0.267	0.264	0.260	0.255
27961	0.266	0.269	0.267	0.264	0.260	0.255



# **LAMPIRAN D**

Propagasi Scouring Zona 3 Kondisi Diameter 32 Inch

**Tabel propagasi *scouring* zona 3 diameter 32 inch dan embedment -0.05D**

t (s)	St	St	St	St	St	St
	d=29.00m	d=32.80m	d=32.60m	d=40.40m	d=44.40m	d=48.00m
15385	0.189	0.173	0.191	0.222	0.267	0.331
15389	0.189	0.173	0.191	0.222	0.267	0.331
15393	0.189	0.173	0.191	0.222	0.267	0.331
15397	0.189	0.173	0.191	0.222	0.267	0.331
15401	0.189	0.173	0.191	0.222	0.267	0.331
15405	0.189	0.173	0.191	0.222	0.267	0.331
15409	0.189	0.173	0.191	0.222	0.267	0.331
16269	0.189	0.173	0.192	0.222	0.268	0.333
16273	0.189	0.173	0.192	0.222	0.268	0.333
16277	0.189	0.173	0.192	0.222	0.268	0.333
16281	0.189	0.173	0.192	0.222	0.268	0.333
16285	0.189	0.173	0.192	0.222	0.268	0.333
16289	0.189	0.173	0.192	0.222	0.268	0.333
16293	0.189	0.173	0.192	0.222	0.268	0.333
16853	0.190	0.173	0.192	0.222	0.268	0.334
16857	0.190	0.173	0.192	0.222	0.268	0.334
16861	0.190	0.173	0.192	0.222	0.268	0.334
16865	0.190	0.173	0.192	0.222	0.268	0.334
16869	0.190	0.173	0.192	0.222	0.268	0.334
18449	0.190	0.173	0.192	0.223	0.269	0.335
18453	0.190	0.173	0.192	0.223	0.269	0.335
18457	0.190	0.173	0.192	0.223	0.269	0.335
18461	0.190	0.173	0.192	0.223	0.269	0.335
18465	0.190	0.173	0.192	0.223	0.269	0.335
18469	0.190	0.173	0.192	0.223	0.269	0.335
21793	0.190	0.173	0.192	0.223	0.270	0.337
21797	0.190	0.173	0.192	0.223	0.270	0.337
21801	0.190	0.173	0.192	0.223	0.270	0.337
21805	0.190	0.173	0.192	0.223	0.270	0.337
21809	0.190	0.173	0.192	0.223	0.270	0.337
26477	0.190	0.173	0.192	0.223	0.270	0.339
26481	0.190	0.173	0.192	0.223	0.270	0.339
26485	0.190	0.173	0.192	0.223	0.270	0.339
26489	0.190	0.173	0.192	0.223	0.270	0.339
26493	0.190	0.173	0.192	0.223	0.270	0.339
26497	0.190	0.173	0.192	0.223	0.270	0.339
26501	0.190	0.173	0.192	0.223	0.270	0.339
26505	0.190	0.173	0.192	0.223	0.270	0.339
26509	0.190	0.173	0.192	0.223	0.270	0.339
26513	0.190	0.173	0.192	0.223	0.270	0.339

**Tabel propagasi *scouring* zona 3 diameter 32 inch dan embedment -0.15D**

t (s)	St	St	St	St	St	St
	d=29.00m	d=32.80m	d=32.60m	d=40.40m	d=44.40m	d=48.00m
15549	0.201	0.184	0.203	0.235	0.283	0.352
15553	0.201	0.184	0.203	0.235	0.283	0.352
15557	0.201	0.184	0.203	0.235	0.283	0.352
15561	0.201	0.184	0.203	0.235	0.283	0.352
15565	0.201	0.184	0.203	0.235	0.283	0.352
15569	0.201	0.184	0.203	0.235	0.283	0.352
16437	0.201	0.184	0.204	0.235	0.284	0.354
16441	0.201	0.184	0.204	0.235	0.284	0.354
16445	0.201	0.184	0.204	0.235	0.284	0.354
16449	0.201	0.184	0.204	0.235	0.284	0.354
16453	0.201	0.184	0.204	0.235	0.284	0.354
16457	0.201	0.184	0.204	0.235	0.284	0.354
17029	0.202	0.184	0.204	0.235	0.284	0.355
17033	0.202	0.184	0.204	0.235	0.284	0.355
17037	0.202	0.184	0.204	0.235	0.284	0.355
17041	0.202	0.184	0.204	0.235	0.284	0.355
17045	0.202	0.184	0.204	0.235	0.284	0.355
17049	0.202	0.184	0.204	0.235	0.284	0.355
17053	0.202	0.184	0.204	0.235	0.284	0.355
18621	0.202	0.184	0.204	0.236	0.285	0.356
18625	0.202	0.184	0.204	0.236	0.285	0.356
18629	0.202	0.184	0.204	0.236	0.285	0.356
18633	0.202	0.184	0.204	0.236	0.285	0.356
18637	0.202	0.184	0.204	0.236	0.285	0.356
18641	0.202	0.184	0.204	0.236	0.285	0.356
18645	0.202	0.184	0.204	0.236	0.285	0.356
21997	0.202	0.184	0.204	0.236	0.286	0.358
22001	0.202	0.184	0.204	0.236	0.286	0.358
22005	0.202	0.184	0.204	0.236	0.286	0.358
22009	0.202	0.184	0.204	0.236	0.286	0.358
22013	0.202	0.184	0.204	0.236	0.286	0.358
26721	0.202	0.184	0.204	0.236	0.286	0.360
26725	0.202	0.184	0.204	0.236	0.286	0.360
26729	0.202	0.184	0.204	0.236	0.286	0.360
26733	0.202	0.184	0.204	0.236	0.286	0.360
26737	0.202	0.184	0.204	0.236	0.286	0.360
26741	0.202	0.184	0.204	0.236	0.286	0.360
26745	0.202	0.184	0.204	0.236	0.286	0.360
26749	0.202	0.184	0.204	0.236	0.286	0.360
26753	0.202	0.184	0.204	0.236	0.286	0.360
26757	0.202	0.184	0.204	0.236	0.286	0.360

**Tabel propagasi *scouring* zona 3 diameter 32 inch dan embedment -0.25D**

t (s)	St	St	St	St	St	St
	d=29.00m	d=32.80m	d=32.60m	d=40.40m	d=44.40m	d=48.00m
15701	0.213	0.195	0.215	0.250	0.301	0.374
15705	0.213	0.195	0.215	0.250	0.301	0.374
15709	0.213	0.195	0.215	0.250	0.301	0.374
15713	0.213	0.195	0.215	0.250	0.301	0.374
15717	0.213	0.195	0.215	0.250	0.301	0.374
15721	0.213	0.195	0.215	0.250	0.301	0.374
15725	0.213	0.195	0.215	0.250	0.301	0.374
16593	0.213	0.195	0.216	0.250	0.301	0.376
16597	0.213	0.195	0.216	0.250	0.301	0.376
16601	0.213	0.195	0.216	0.250	0.301	0.376
16605	0.213	0.195	0.216	0.250	0.301	0.376
16609	0.213	0.195	0.216	0.250	0.301	0.376
16613	0.213	0.195	0.216	0.250	0.301	0.376
16617	0.213	0.195	0.216	0.250	0.301	0.376
17193	0.214	0.195	0.216	0.250	0.302	0.376
17197	0.214	0.195	0.216	0.250	0.302	0.376
17201	0.214	0.195	0.216	0.250	0.302	0.376
17205	0.214	0.195	0.216	0.250	0.302	0.376
17209	0.214	0.195	0.216	0.250	0.302	0.376
17213	0.214	0.195	0.216	0.250	0.302	0.376
18809	0.214	0.195	0.216	0.251	0.303	0.378
18813	0.214	0.195	0.216	0.251	0.303	0.378
18817	0.214	0.195	0.216	0.251	0.303	0.378
18821	0.214	0.195	0.216	0.251	0.303	0.378
18825	0.214	0.195	0.216	0.251	0.303	0.378
18829	0.214	0.195	0.216	0.251	0.303	0.378
18833	0.214	0.195	0.216	0.251	0.303	0.378
22205	0.214	0.195	0.216	0.251	0.304	0.380
22209	0.214	0.195	0.216	0.251	0.304	0.380
22213	0.214	0.195	0.216	0.251	0.304	0.380
22217	0.214	0.195	0.216	0.251	0.304	0.380
22221	0.214	0.195	0.216	0.251	0.304	0.380
22225	0.214	0.195	0.216	0.251	0.304	0.380
22229	0.214	0.195	0.216	0.251	0.304	0.380
26961	0.214	0.195	0.216	0.251	0.304	0.382
26965	0.214	0.195	0.216	0.251	0.304	0.382
26969	0.214	0.195	0.216	0.251	0.304	0.382
26973	0.214	0.195	0.216	0.251	0.304	0.382
26977	0.214	0.195	0.216	0.251	0.304	0.382
26981	0.214	0.195	0.216	0.251	0.304	0.382
26985	0.214	0.195	0.216	0.251	0.304	0.382





# **LAMPIRAN E**

Propagasi Scouring Zona 17-18 Kondisi Diameter 32 inchi

**Tabel propagasi *scouring* zona 17-18 diameter 32 inch dan embedment -0.05D**

t (s)	St	St	St	St	St	St
	d=7.00m	d=8.66m	d=10.32m	d=11.98m	d=13.64m	d=15.30m
23749	0.208	0.220	0.218	0.212	0.202	0.189
23753	0.208	0.220	0.218	0.212	0.202	0.189
23757	0.208	0.220	0.218	0.212	0.202	0.189
23761	0.208	0.220	0.218	0.212	0.202	0.189
23765	0.208	0.220	0.218	0.212	0.202	0.189
23769	0.208	0.220	0.218	0.212	0.202	0.189
23773	0.208	0.220	0.218	0.212	0.202	0.189
24961	0.209	0.220	0.219	0.213	0.203	0.191
24965	0.209	0.220	0.219	0.213	0.203	0.191
24969	0.209	0.220	0.219	0.213	0.203	0.191
24973	0.209	0.220	0.219	0.213	0.203	0.191
24977	0.209	0.220	0.219	0.213	0.203	0.191
24981	0.209	0.220	0.219	0.213	0.203	0.191
29853	0.211	0.220	0.219	0.214	0.206	0.196
29857	0.211	0.220	0.219	0.214	0.206	0.196
29861	0.211	0.220	0.219	0.214	0.206	0.196
29865	0.211	0.220	0.219	0.214	0.206	0.196
29869	0.211	0.220	0.219	0.214	0.206	0.196
29873	0.211	0.220	0.219	0.214	0.206	0.196
29877	0.211	0.220	0.219	0.214	0.206	0.196
35161	0.212	0.220	0.219	0.214	0.207	0.199
35165	0.212	0.220	0.219	0.214	0.207	0.199
35169	0.212	0.220	0.219	0.214	0.207	0.199
35173	0.212	0.220	0.219	0.214	0.207	0.199
35177	0.212	0.220	0.219	0.214	0.207	0.199
35181	0.212	0.220	0.219	0.214	0.207	0.199
35185	0.212	0.220	0.219	0.214	0.207	0.199
39505	0.212	0.220	0.219	0.214	0.208	0.201
39509	0.212	0.220	0.219	0.214	0.208	0.201
39513	0.212	0.220	0.219	0.214	0.208	0.201
39517	0.212	0.220	0.219	0.214	0.208	0.201
53621	0.212	0.220	0.219	0.214	0.208	0.203
53625	0.212	0.220	0.219	0.214	0.208	0.203
53629	0.212	0.220	0.219	0.214	0.208	0.203
53633	0.212	0.220	0.219	0.214	0.208	0.203
53637	0.212	0.220	0.219	0.214	0.208	0.203
53641	0.212	0.220	0.219	0.214	0.208	0.203
53645	0.212	0.220	0.219	0.214	0.208	0.203
53649	0.212	0.220	0.219	0.214	0.208	0.203
53653	0.212	0.220	0.219	0.214	0.208	0.203
53657	0.212	0.220	0.219	0.214	0.208	0.203

**Tabel propagasi *scouring* zona 17-18 diameter 32 inch dan embedment -0.15D**

t (s)	St	St	St	St	St	St
	d=7.00m	d=8.66m	d=10.32m	d=11.98m	d=13.64m	d=15.30m
23989	0.221	0.234	0.231	0.225	0.215	0.200
23993	0.221	0.234	0.231	0.225	0.215	0.200
23997	0.221	0.234	0.231	0.225	0.215	0.200
24001	0.221	0.234	0.231	0.225	0.215	0.200
24005	0.221	0.234	0.231	0.225	0.215	0.200
24009	0.221	0.234	0.231	0.225	0.215	0.200
24013	0.221	0.234	0.231	0.225	0.215	0.200
24017	0.221	0.234	0.231	0.225	0.215	0.200
25197	0.222	0.234	0.232	0.226	0.216	0.202
25201	0.222	0.234	0.232	0.226	0.216	0.202
25205	0.222	0.234	0.232	0.226	0.216	0.202
25209	0.222	0.234	0.232	0.226	0.216	0.202
25213	0.222	0.234	0.232	0.226	0.216	0.202
25217	0.222	0.234	0.232	0.226	0.216	0.202
30141	0.224	0.234	0.232	0.227	0.219	0.208
30145	0.224	0.234	0.232	0.227	0.219	0.208
30149	0.224	0.234	0.232	0.227	0.219	0.208
30153	0.224	0.234	0.232	0.227	0.219	0.208
30157	0.224	0.234	0.232	0.227	0.219	0.208
30161	0.224	0.234	0.232	0.227	0.219	0.208
30165	0.224	0.234	0.232	0.227	0.219	0.208
35505	0.225	0.234	0.232	0.227	0.220	0.211
35509	0.225	0.234	0.232	0.227	0.220	0.211
35513	0.225	0.234	0.232	0.227	0.220	0.211
35517	0.225	0.234	0.232	0.227	0.220	0.211
35521	0.225	0.234	0.232	0.227	0.220	0.211
35525	0.225	0.234	0.232	0.227	0.220	0.211
35529	0.225	0.234	0.232	0.227	0.220	0.211
35533	0.225	0.234	0.232	0.227	0.220	0.211
35537	0.225	0.234	0.232	0.227	0.220	0.211
39905	0.225	0.234	0.232	0.227	0.221	0.213
39909	0.225	0.234	0.232	0.227	0.221	0.213
39913	0.225	0.234	0.232	0.227	0.221	0.213
39917	0.225	0.234	0.232	0.227	0.221	0.213
39921	0.225	0.234	0.232	0.227	0.221	0.213
39925	0.225	0.234	0.232	0.227	0.221	0.213
54133	0.225	0.234	0.232	0.227	0.221	0.215
54137	0.225	0.234	0.232	0.227	0.221	0.215
54141	0.225	0.234	0.232	0.227	0.221	0.215
54145	0.225	0.234	0.232	0.227	0.221	0.215
54149	0.225	0.234	0.232	0.227	0.221	0.215

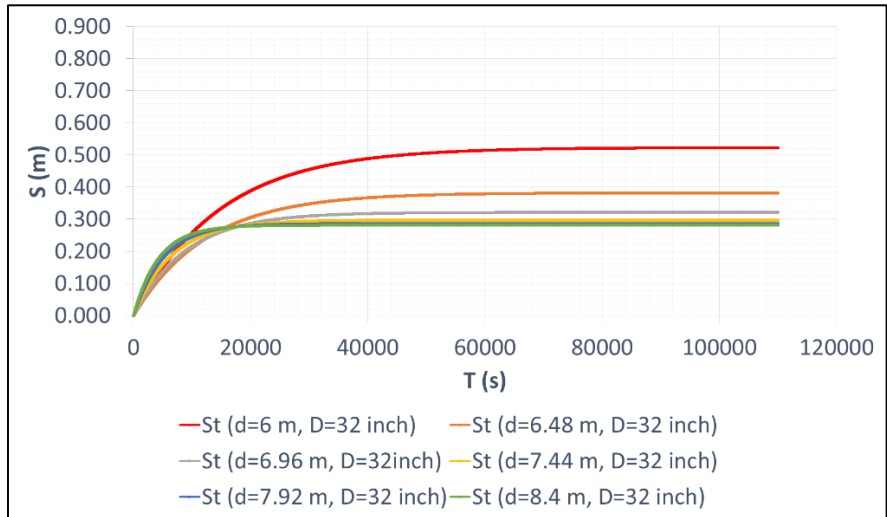
**Tabel propagasi *scouring* zona 17-18 diameter 32 inch dan embedment -0.25D**

t (s)	St	St	St	St	St	St
	d=7.00m	d=8.66m	d=10.32m	d=11.98m	d=13.64m	d=15.30m
24217	0.235	0.248	0.245	0.239	0.229	0.214
24221	0.235	0.248	0.245	0.239	0.229	0.214
24225	0.235	0.248	0.245	0.239	0.229	0.214
24229	0.235	0.248	0.245	0.239	0.229	0.214
24233	0.235	0.248	0.245	0.239	0.229	0.214
24237	0.235	0.248	0.245	0.239	0.229	0.214
24241	0.235	0.248	0.245	0.239	0.229	0.214
25437	0.236	0.248	0.246	0.240	0.230	0.216
25441	0.236	0.248	0.246	0.240	0.230	0.216
25445	0.236	0.248	0.246	0.240	0.230	0.216
25449	0.236	0.248	0.246	0.240	0.230	0.216
25453	0.236	0.248	0.246	0.240	0.230	0.216
25457	0.236	0.248	0.246	0.240	0.230	0.216
25461	0.236	0.248	0.246	0.240	0.230	0.216
30437	0.238	0.248	0.246	0.241	0.233	0.221
30441	0.238	0.248	0.246	0.241	0.233	0.221
30445	0.238	0.248	0.246	0.241	0.233	0.221
30449	0.238	0.248	0.246	0.241	0.233	0.221
30453	0.238	0.248	0.246	0.241	0.233	0.221
30457	0.238	0.248	0.246	0.241	0.233	0.221
30461	0.238	0.248	0.246	0.241	0.233	0.221
30465	0.238	0.248	0.246	0.241	0.233	0.221
35857	0.239	0.248	0.246	0.241	0.234	0.225
35861	0.239	0.248	0.246	0.241	0.234	0.225
35865	0.239	0.248	0.246	0.241	0.234	0.225
35869	0.239	0.248	0.246	0.241	0.234	0.225
35873	0.239	0.248	0.246	0.241	0.234	0.225
35877	0.239	0.248	0.246	0.241	0.234	0.225
40305	0.239	0.248	0.246	0.241	0.235	0.226
40309	0.239	0.248	0.246	0.241	0.235	0.226
40313	0.239	0.248	0.246	0.241	0.235	0.226
40317	0.239	0.248	0.246	0.241	0.235	0.226
40321	0.239	0.248	0.246	0.241	0.235	0.226
40325	0.239	0.248	0.246	0.241	0.235	0.226
40329	0.239	0.248	0.246	0.241	0.235	0.227
54697	0.239	0.248	0.246	0.241	0.235	0.229
54701	0.239	0.248	0.246	0.241	0.235	0.229
54705	0.239	0.248	0.246	0.241	0.235	0.229
54709	0.239	0.248	0.246	0.241	0.235	0.229
54713	0.239	0.248	0.246	0.241	0.235	0.229

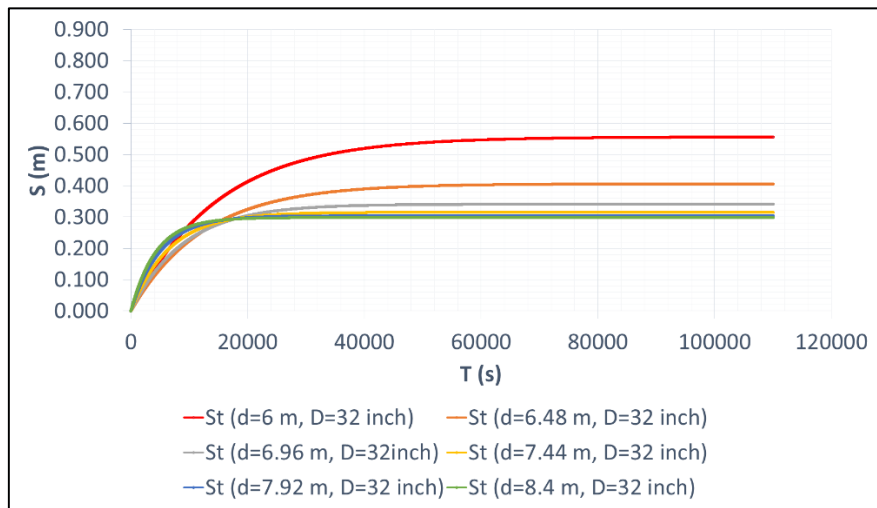


# **LAMPIRAN F**

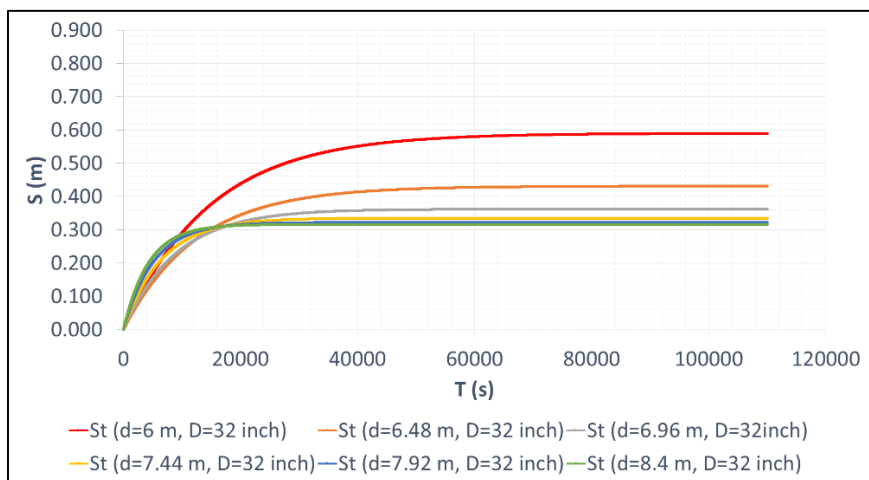
Grafik Propagasi Scouring terhadap Waktu Seluruh Zona Kondisi  
Diameter 32 Inch



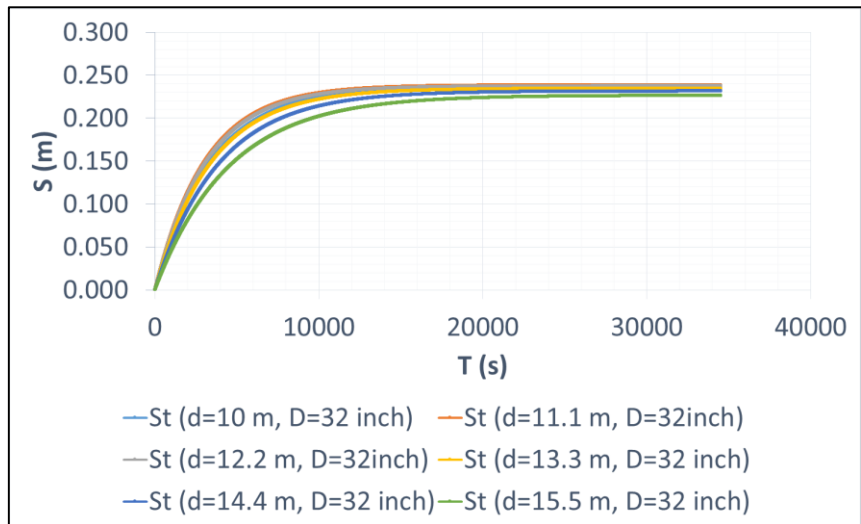
Gambar lampiran 1. Waktu propagasi *scouring* zona 1  $D = 32$  inch, &  $e = -0.05D$



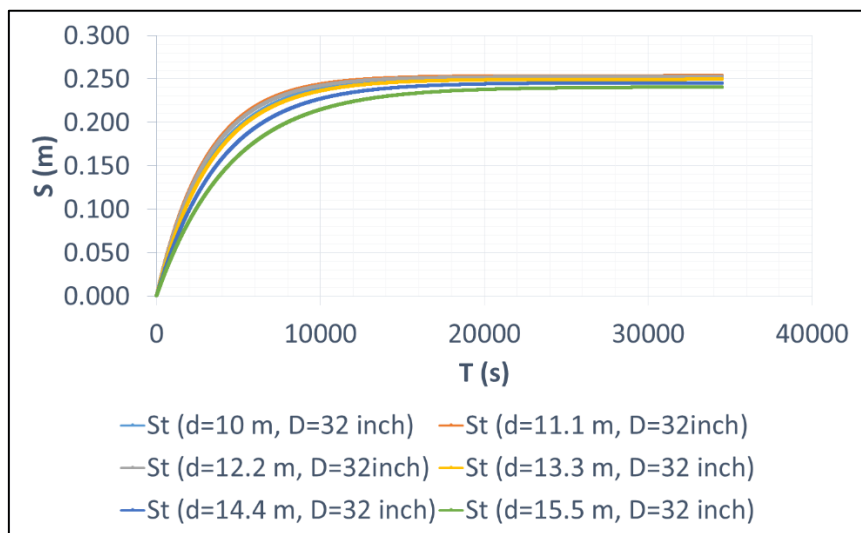
Gambar lampiran 2. Waktu propagasi *scouring* zona 1  $D = 32$  inch, &  $e = -0.15D$



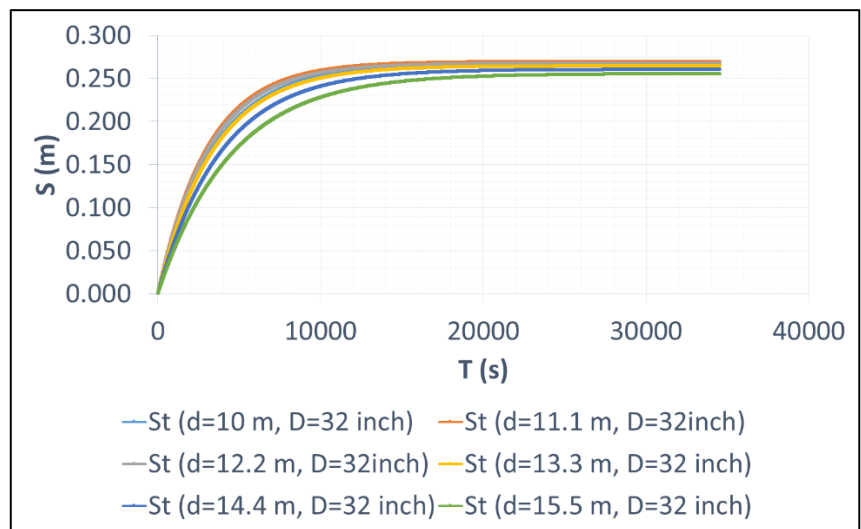
Gambar lampiran 3. Waktu propagasi *scouring* zona 1  $D = 32$  inch, &  $e = -0.25D$



Gambar lampiran 4. Waktu propagasi *scouring* zona 2  $D = 32$  inch, &  $e = -0.05D$

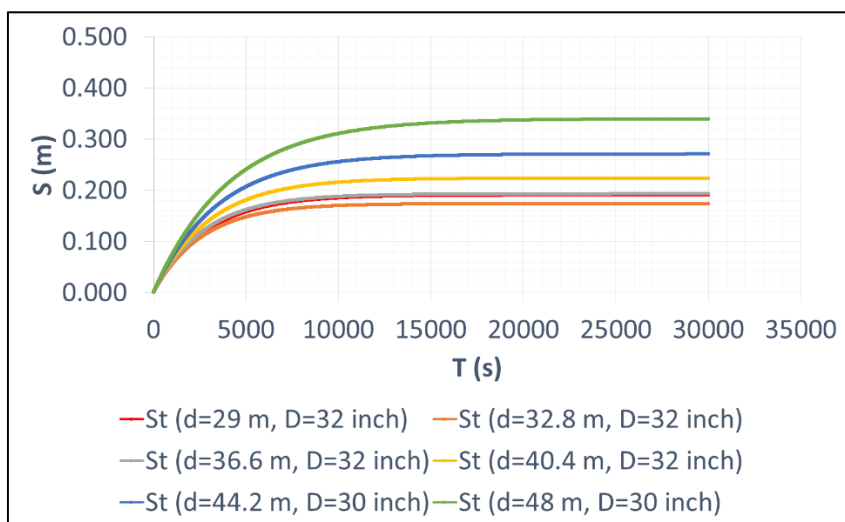


Gambar lampiran 5. Waktu propagasi *scouring* zona 2  $D = 32$  inch, &  $e = -0.15D$

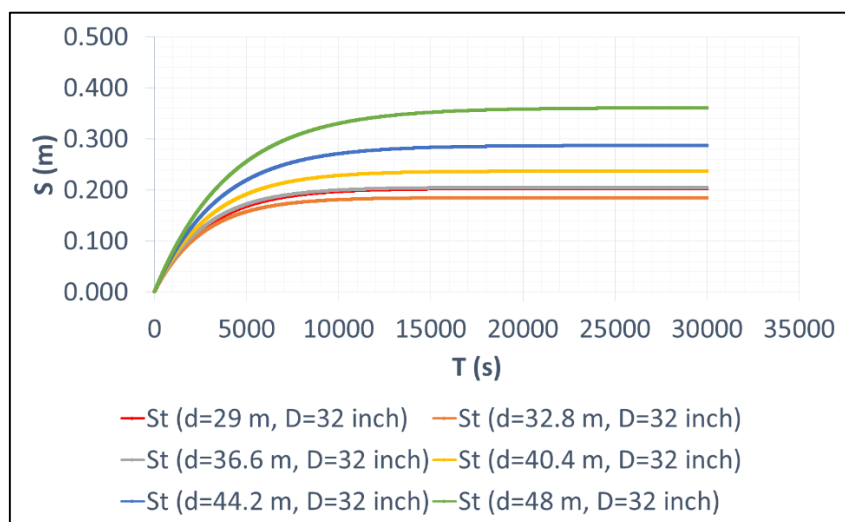


Gambar lampiran 6. Waktu propagasi *scouring* zona 2  $D = 32$  inch, &  $e = -0.25D$

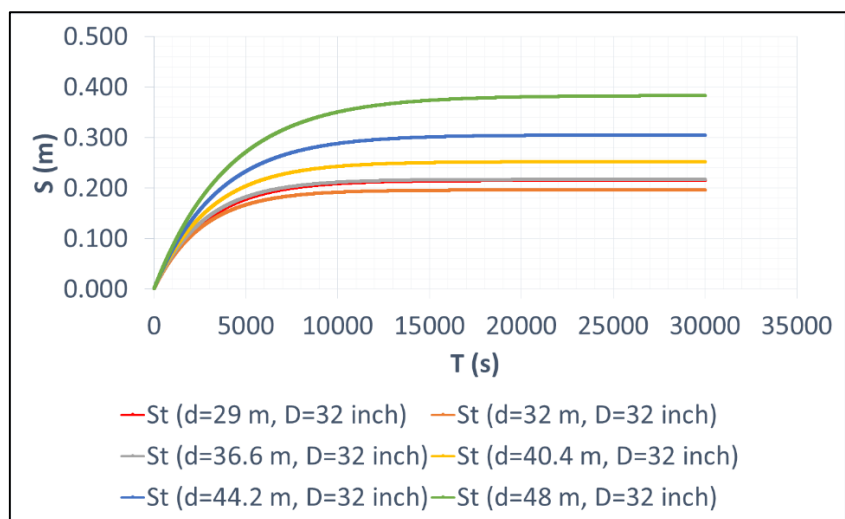




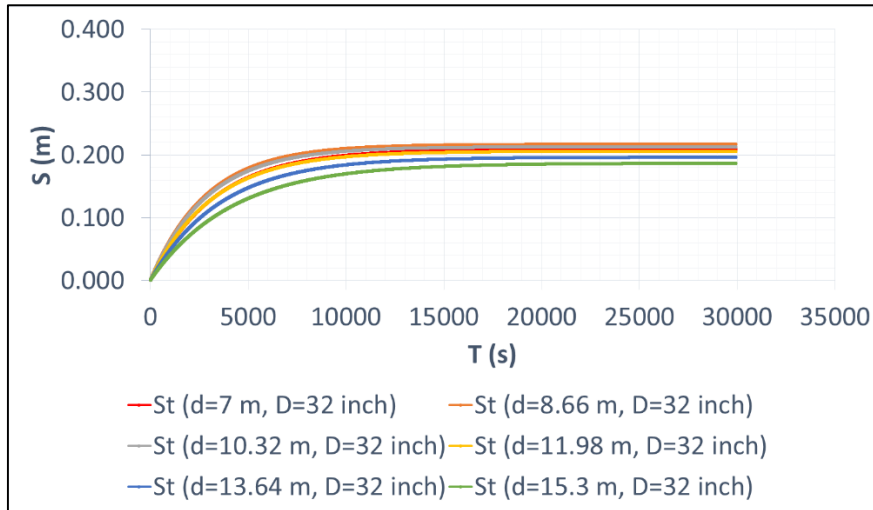
Gambar lampiran 7. Waktu propagasi *scouring* zona 3  $D = 32$  inch, &  $e = -0.05D$



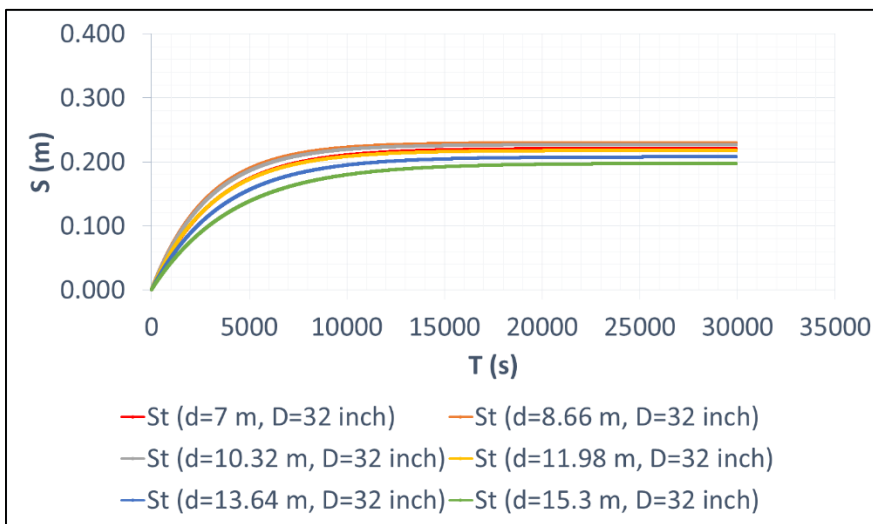
Gambar lampiran 8. Waktu propagasi *scouring* zona 3  $D = 32$  inch, &  $e = -0.15D$



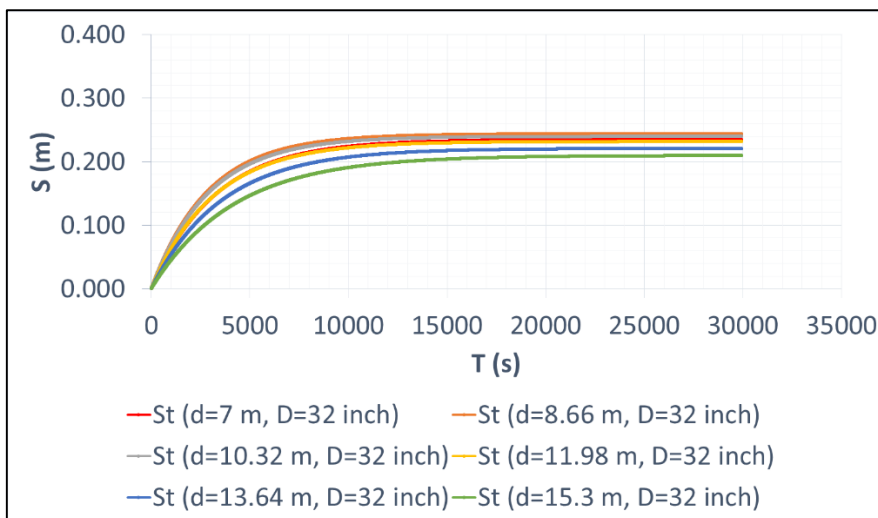
Gambar lampiran 9. Waktu propagasi *scouring* zona 3  $D = 32$  inch, &  $e = -0.25D$



Gambar lampiran 10. Waktu propagasi *scouring* zona 17-18  $D = 32$  inch, &  $e = -0.05D$



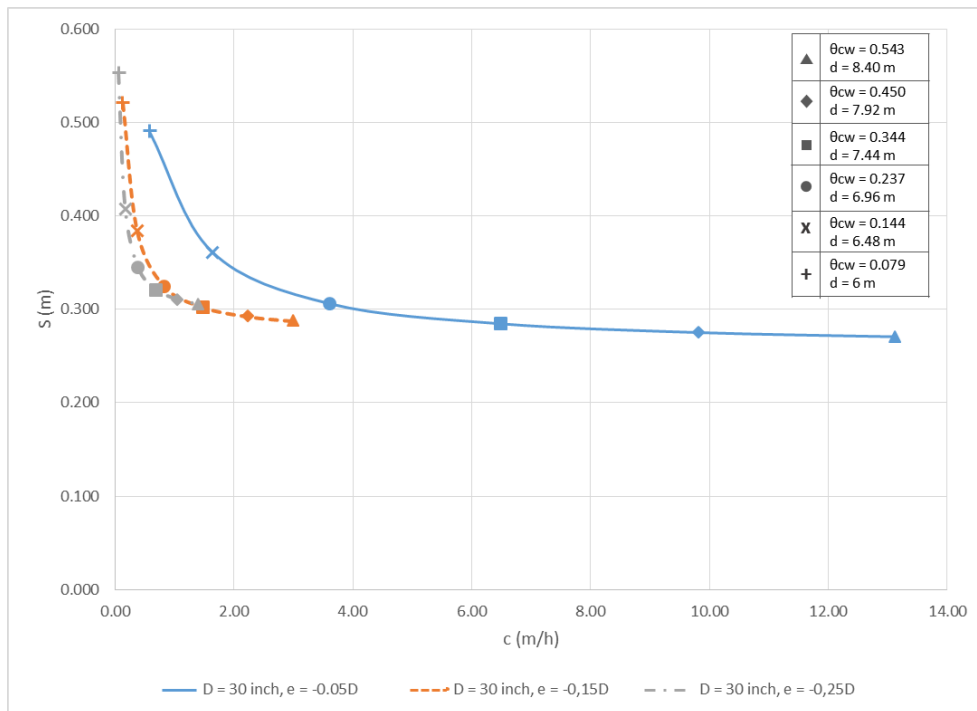
Gambar lampiran 11. Waktu propagasi *scouring* zona 17-18  $D = 32$  inch, &  $e = -0.15D$



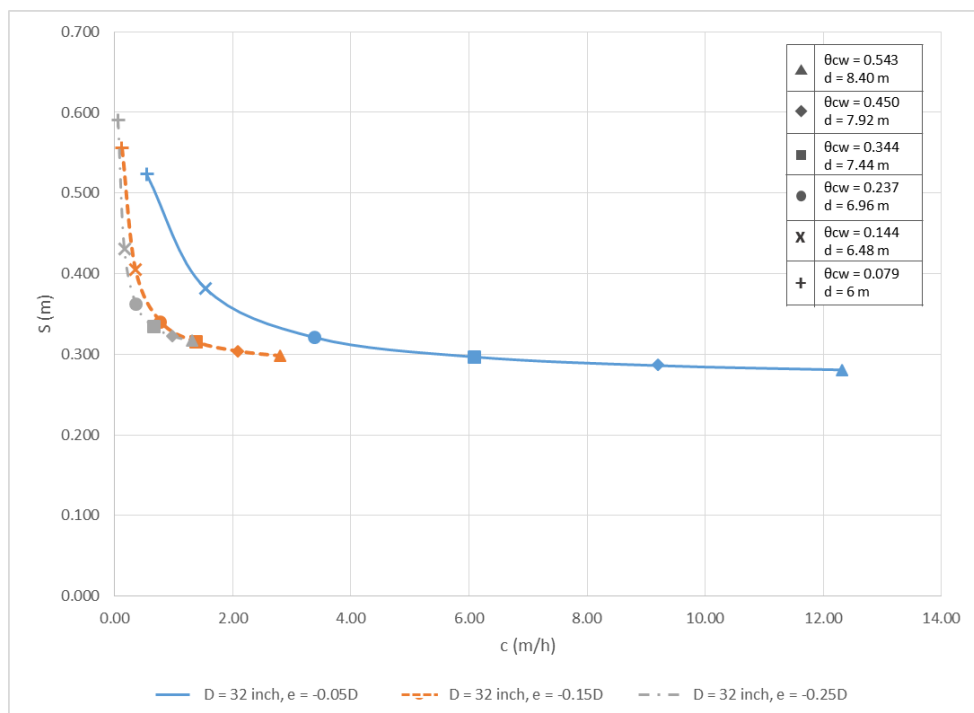
Gambar lampiran 12. Waktu propagasi *scouring* zona 17-18  $D = 32$  inch, &  $e = -0.25D$

# LAMPIRAN G

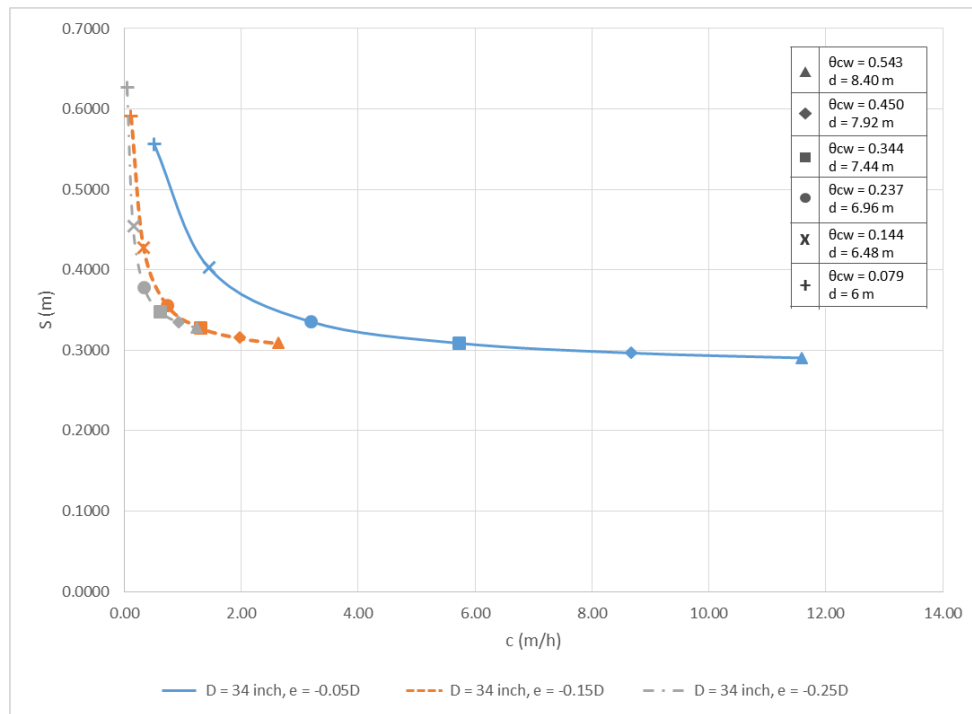
Grafik Laju Longitudinal Seluruh Zona



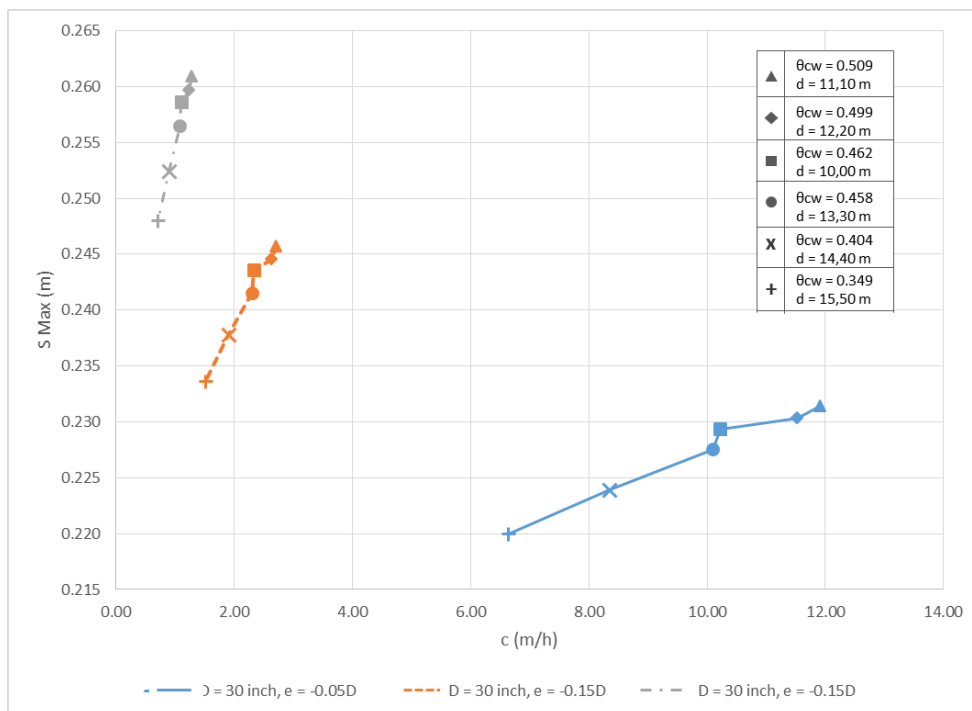
Gambar lampiran 13. Grafik Laju Propagasi Longitudinal Zona 1  $D = 30$  inch



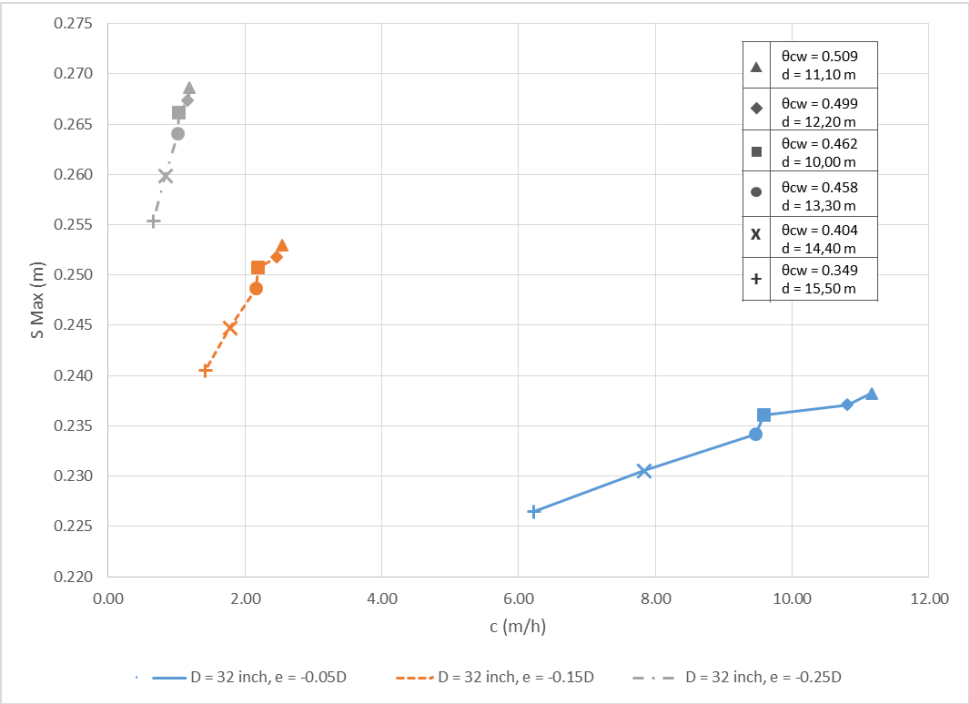
Gambar lampiran 14. Grafik Laju Propagasi Longitudinal Zona 1  $D = 32$  inch



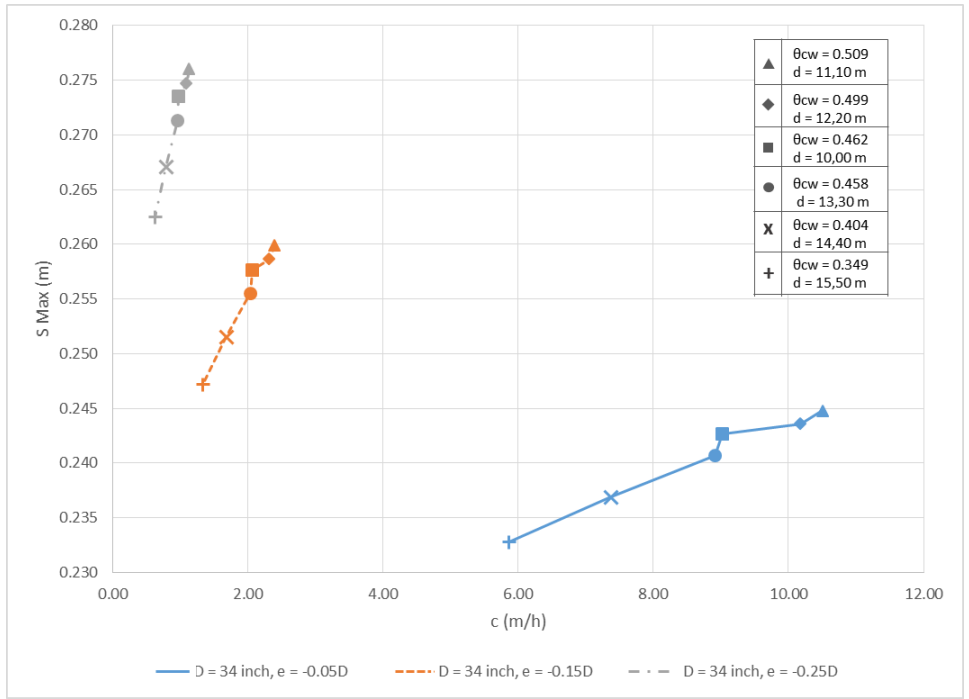
Gambar lampiran 15. Grafik Laju Propagasi Longitudinal Zona 1 D = 34 inch



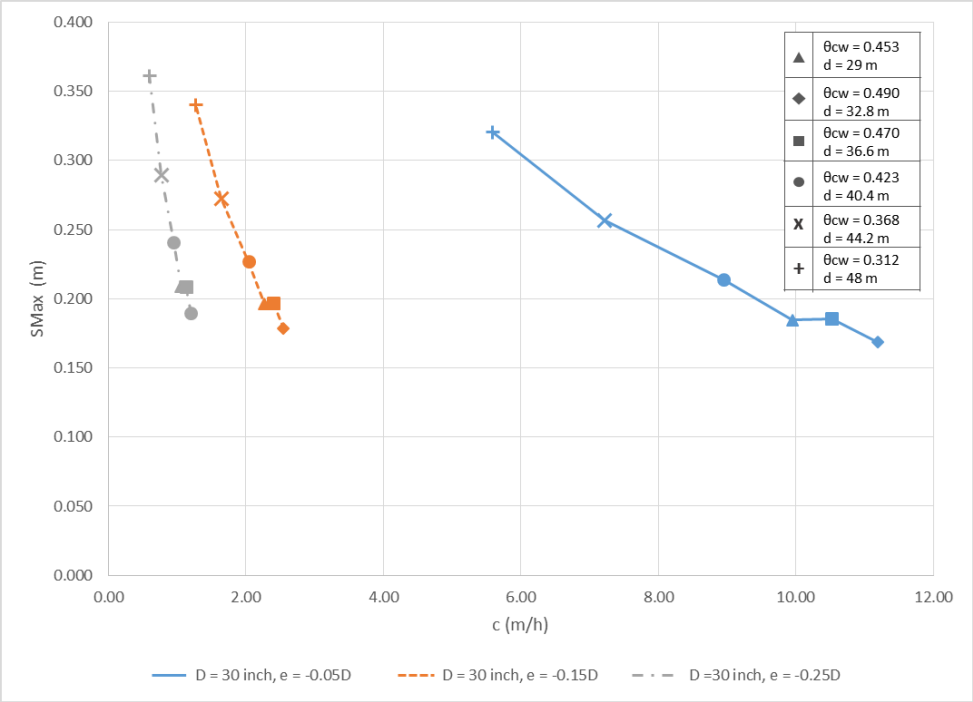
Gambar lampiran 16. Grafik Laju Propagasi Longitudinal Zona 2 D = 30 inch



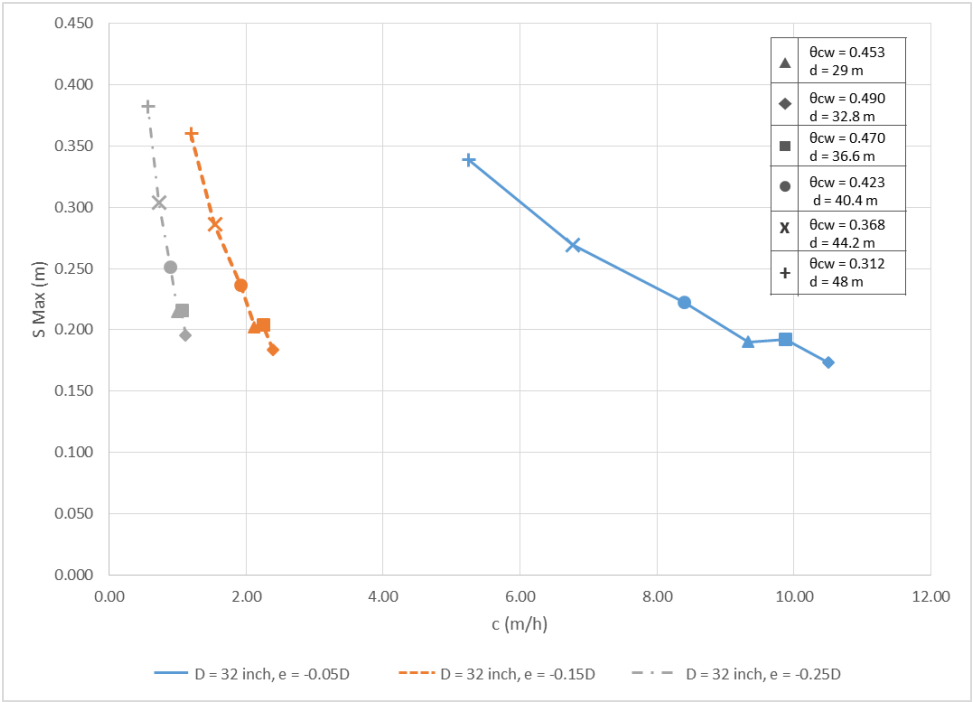
Gambar lampiran 17. Grafik Laju Propagasi Longitudinal Zona 2  $D = 32$  inch



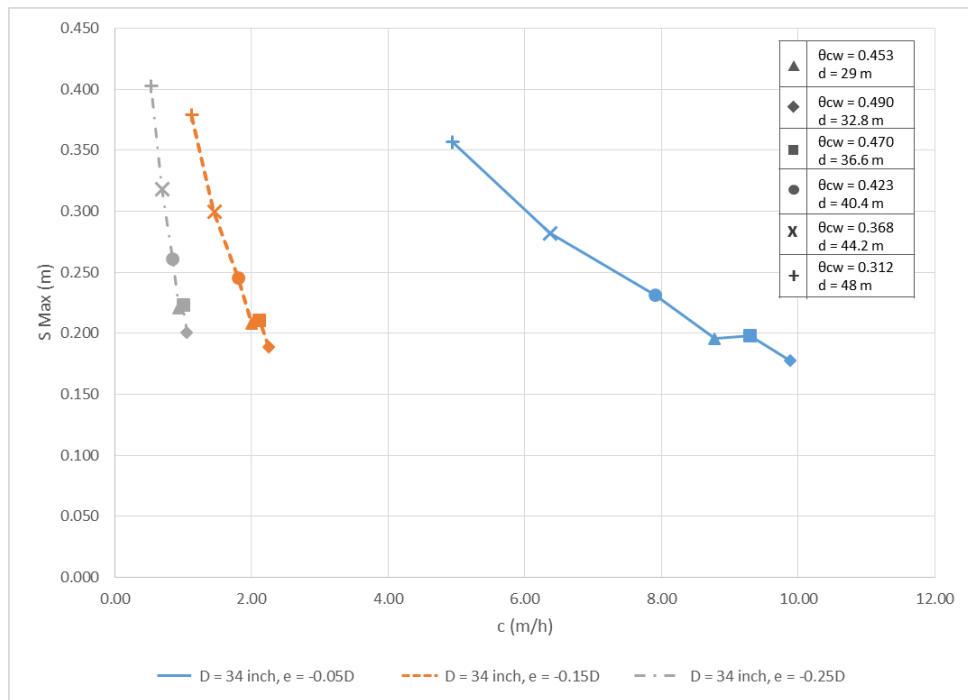
Gambar lampiran 18. Grafik Laju Propagasi Longitudinal Zona 2  $D = 34$  inch



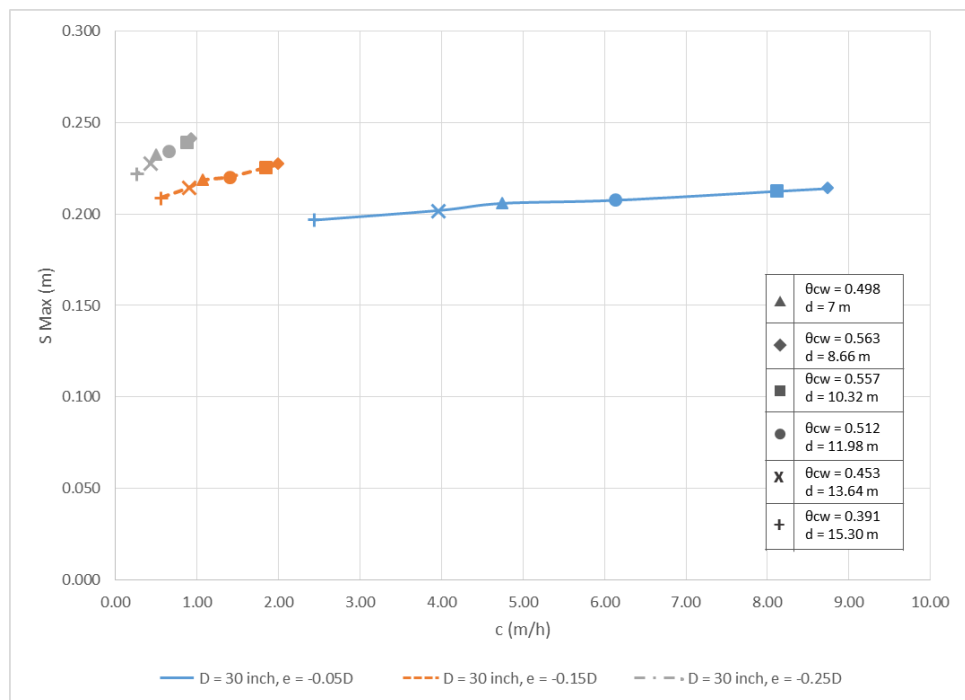
Gambar lampiran 19. Grafik Laju Propagasi Longitudinal Zona 3  $D = 30$  inch



Gambar lampiran 20. Grafik Laju Propagasi Longitudinal Zona 3  $D = 32$  inch

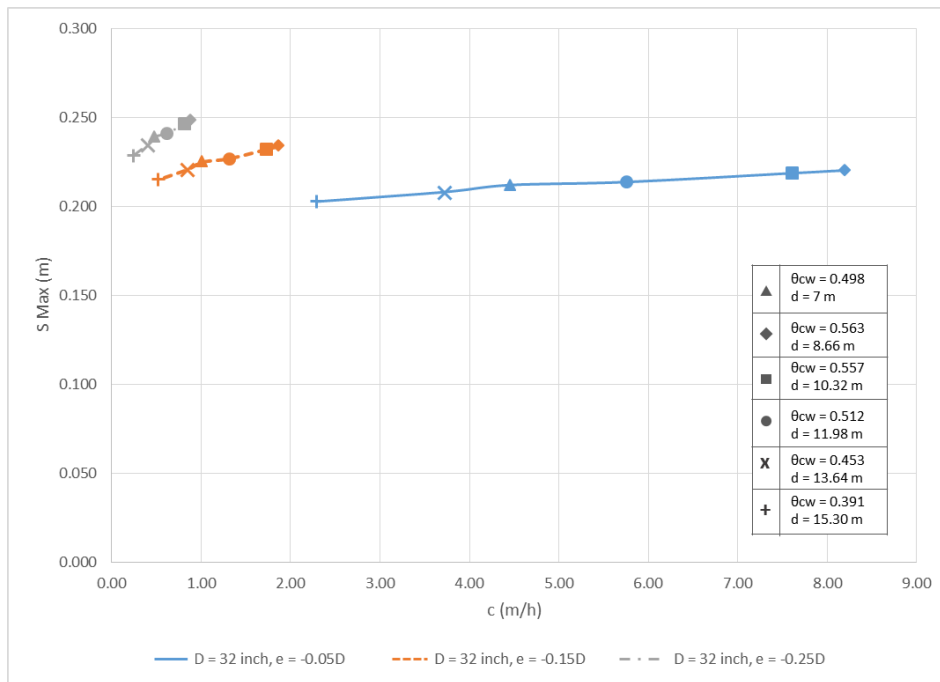


Gambar lampiran 21. Grafik Laju Propagasi Longitudinal Zona 3  $D = 34$  inch

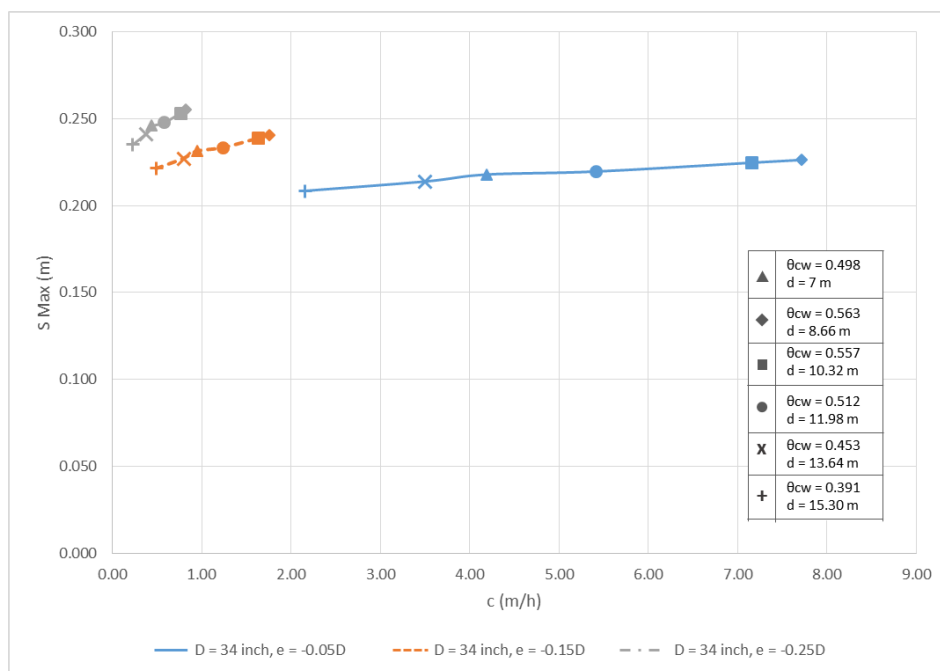


Gambar lampiran 22. Grafik Laju Propagasi Longitudinal Zona 17-18  $D = 30$  inch





Gambar lampiran 23. Grafik Laju Propagasi Longitudinal Zona 17-18  $D = 32$  inch

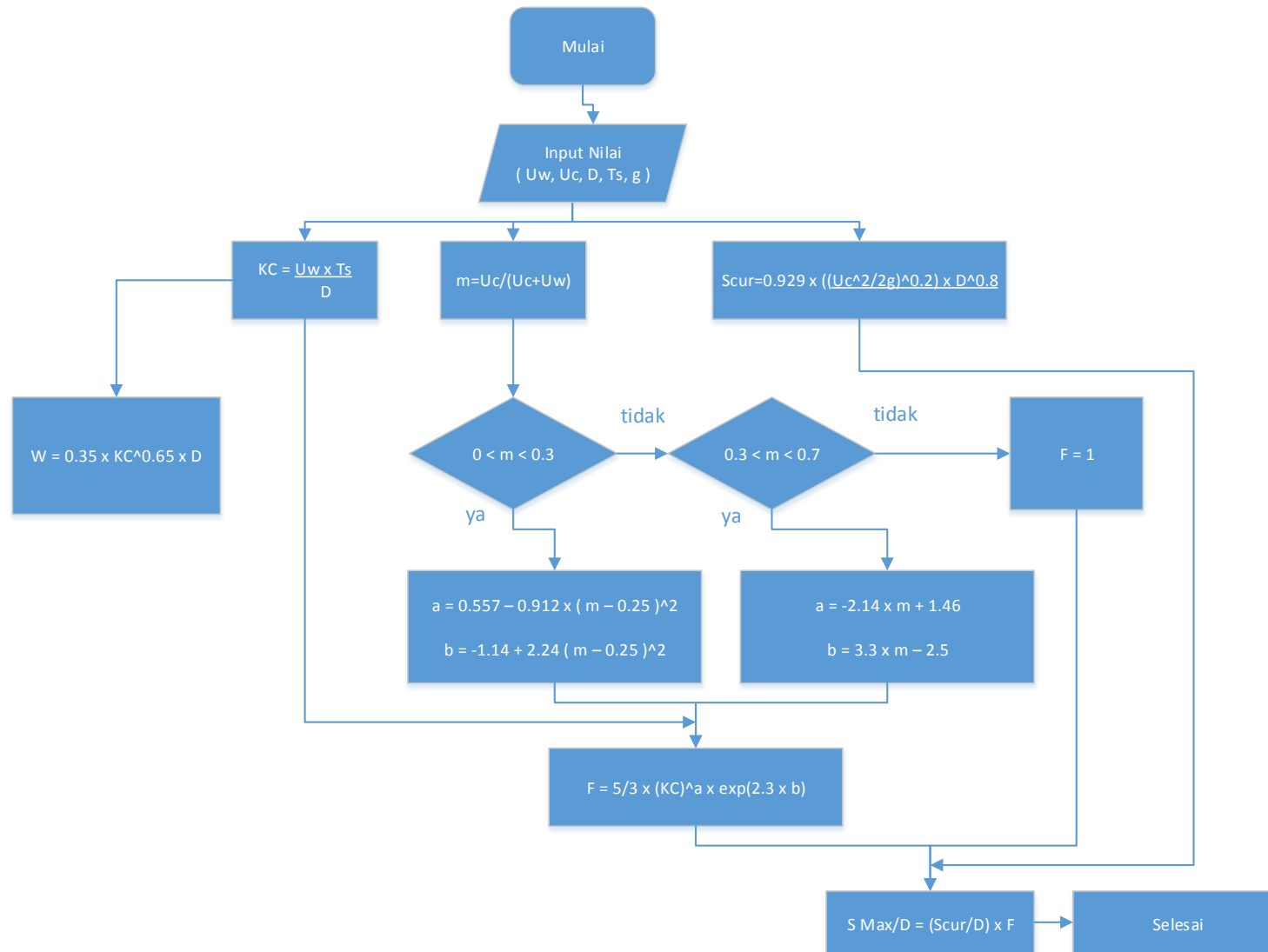


Gambar lampiran 24. Grafik Laju Propagasi Longitudinal Zona 17-18  $D = 34$  inch

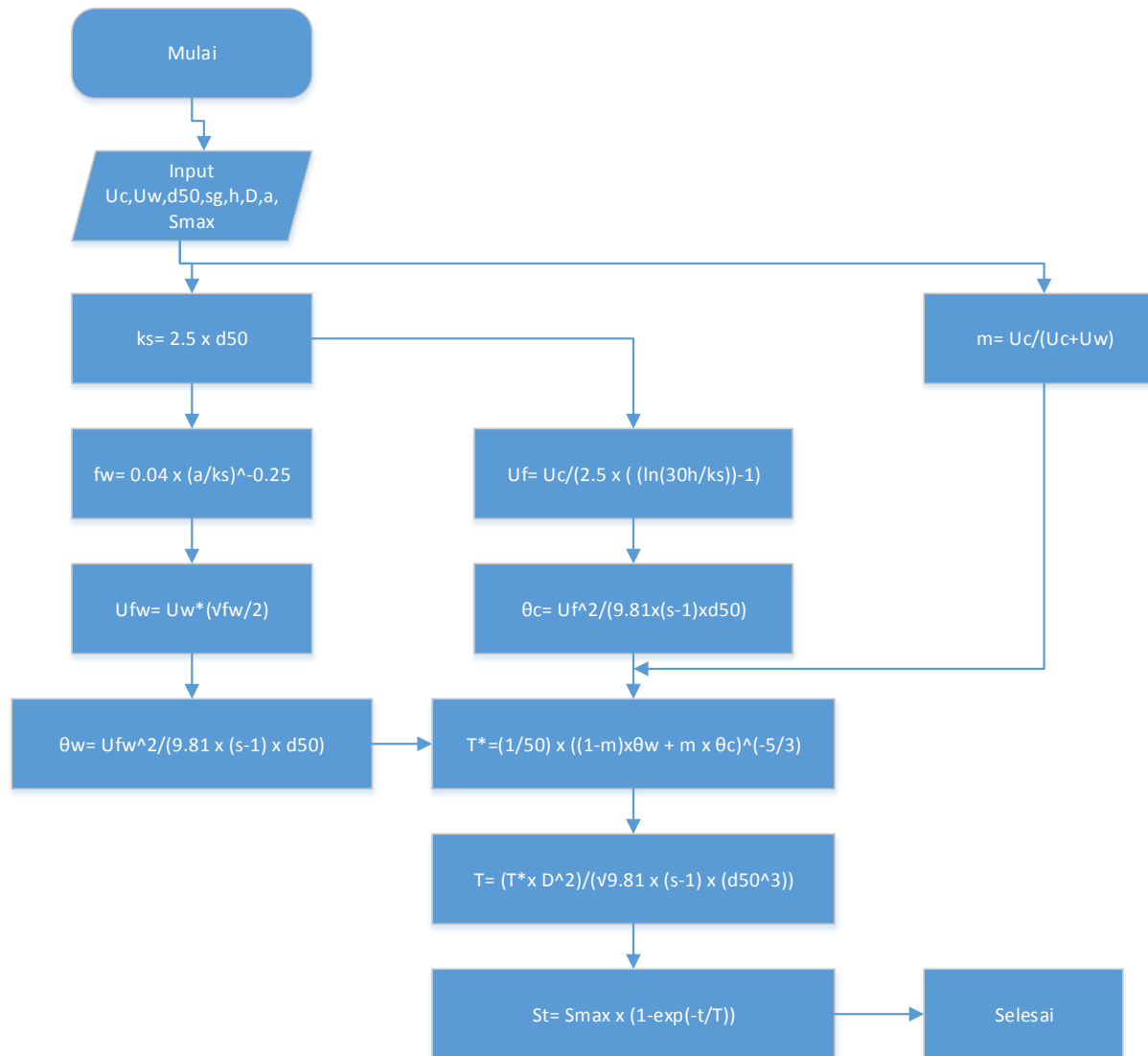
# **LAMPIRAN H**

Syntax Pemodelan Numerik Scilab

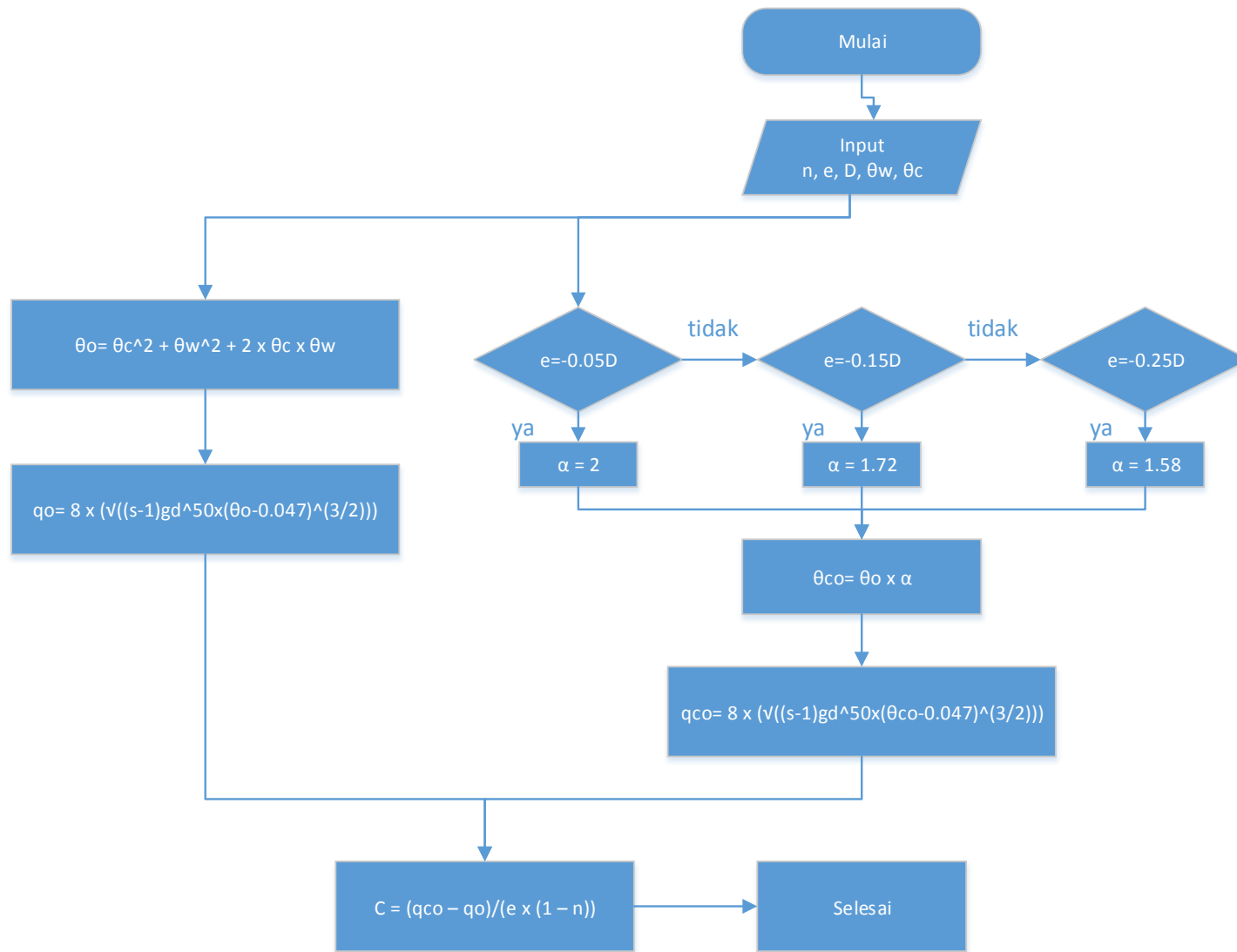
**Diagram syntax scilab program perhitungan kedalaman *scouring* maksimum**



### Diagram syntax scilab perhitungan propagasi *scouring*



## Diagram perhitungan laju propagasi longitudinal



## Syntax program perhitungan kedalaman *scouring* maksimum

```
function []=APSP()
    disp("Analisis Propagasi Scouring Pipa")
    disp("Kombinasi Arus dan Gelombang")
    disp("Input Data :")
    uw=input("kecepatan orbital gelombang = m/s ")
    t=input("periode gelombang = s ")
    d=input("diameter pipa = m ")
    uc=input("kecepatan arus = m/s ")
    x=input("skala kedalaman embedment (-0.05,-0.15 atau -0.25)")
    g=9.81
    kc=(uw*t)/d
    e=x*d
    scur=0.625*(exp(-0.6*e/d))*d
    m=uc/(uc+uw)
    w=0.35*(kc^0.65)*d
    disp("e (meter)=")
    disp([e])
    disp("kc =")
    disp([kc])
    disp("m =")
    disp([m])
    disp("scur (meter)=")
    disp([scur])
    disp("w (meter)=")
    disp([w])

    if m>=0 & m<=0.3 then
        a=0.557-(0.912*((m-0.25)^2))
        b=-1.14+(2.24*((m-0.25)^2))
        F=(5/3)*((kc)^a)*exp(2.3*b)
        SMax=(scur)*F
        SpD=(scur/d)*F
        disp("F =")
        disp([F])
        disp("SMax (meter)=")
        disp([SMax])
        disp("S/D =")
        disp([SpD])
    elseif m>0.3 & m<=0.7 then
        a=(-2.14*m)+1.46
        b=(3.3*m)-2.5
        F=(5/3)*((kc)^a)*exp(2.3*b)
        SMax=(scur)*F
        SpD=(scur/d)*F
        disp("F =")
```

```
disp([F])
disp("SMax (meter)=")
disp([SMax])
disp("S/D =")
disp([SpD])
elseif m>0.7 & m<=1 then
    F=1
    SMax=scur*F
    SpD=(scur/d)*F
    disp("F =")
    disp([F])
    disp("SMax (meter)=")
    disp([SMax])
    disp("S/D =")
    disp([SpD])
else
    disp("Error, nilai m tidak valid")
end
endfunction
```

## Syntax program perhitungan propagasi kedalaman *scouring* maksimum

```
function []=TSM()
    disp("Analisis Propagasi Scouring secara Time Series")
    disp("input data")
    d50=input("diameter partikel = m")
    a=input("tinggi gelombang puncak = m")
    uc=input("kecepatan arus = m")
    uw=input("kecepatan partikel gelombang dasar = m")
    s=input("specifik graviti=")
    h=input("kedalaman perairan = m")
    d=input("diameter pipa = m")
    ks=2.5*d50
    y=9.81*(s-1)*d50
    ya=sqrt(9.81*(s-1)*d50^3)
    //teta gelombang
    fw=0.04*(a/ks)^(-0.25)
    Ufw=(uw)*sqrt(fw/2)
    tetaw=(Ufw^2)/y
    //teta arus
    Uf=uc/((2.5)*((log(30*h/ks))-1))
    tetac=(Uf^2)/y
    m=uc/(uc+uw)
    tstar=((((1-m)*tetaw+m*tetac)^(-5/3))/50
    T=(tstar*(d^2))/(ya)
    S=input("Kedalaman Scouring Maksimum")
    disp("m =")
    disp([m])
    disp("teta gelombang =")
    disp([tetaw])
    disp("teta arus =")
    disp([tetac])
    disp("tstar")
    disp([tstar])
    disp("T (second) =")
    disp([T])
    x=10000;
    t=1000; while t>=0 & t<=100000, t=t+x,
        St=S*(1-exp(-t/T)), disp(t,St), plot(t,St),
    end

endfunction
```



## Syntax program perhitungan laju propagasi *scouring* longitudinal

```
function []=PSL()
    disp("Analisis Propagasi Scouring Longitudinal")
    disp("Input Data :")
    n=input("porositas")
    d=input("diameter pipa (m) =")
    x=input("e/D(-0.05, -0.15, -0.25)")
    s=input("specifict gravity")
    d50=input("d50")
    disp([x])
    tetac=input("shield parameter arus")
    tetaw=input("shield parameter gelombang")
    tetanol=(tetac^2)+(tetaw^2)+(2*tetac*tetaw)
    disp("shield parameter flat bed =")
    disp([tetanol])
    yo=(s-1)*9.81*(d50^3)
    zo=((tetanol-0.047)^(3/2))
    qo=8*(sqrt(yo))*zo
    disp("qo")
    disp([qo])
    e=d*x
    disp("embedment")
    disp([e])
    if x==(-0.05) then
        alpha=2
        disp("alpha")
        disp([alpha])
    elseif x==(-0.15) then
        alpha=1.72
        disp("alpha=")
        disp([alpha])
    elseif x==(-0.25) then
        alpha=1.58
        disp("alpha=")
        disp([alpha])
    end
    tetacnol=alpha*tetanol
    yco=(s-1)*9.81*(d50^3)
    zco=((tetacnol-0.047)^(3/2))
    qco=8*(sqrt(yco))*zco
    c=(qco-qo)/(e*(1-n))
    ci=c*3600
    disp("shield parameter corner")
    disp([tetacnol])
    disp("qco=")
    disp([qco])
```

```
disp("c (m/s)=")
disp([c])
disp("c (m/h)")
disp([ci])
endfunction
```

## BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama lengkap Bagus Perkasa terlahir di Kabupaten Banyuwangi pada tanggal 5 Agustus 1993. Penulis menuntaskan pendidikan SD di SD Islam Unggulan Terpadu Muhammadiyah Situbondo. Penulis melanjutkan pendidikan SMP di SMPN 1 Situbondo dan pendidikan SMA di SMAN 1 Situbondo. Selama menempuh pendidikan hingga SMA penulis memiliki ketertarikan pada bidang penelitian dan teknologi. Beberapa kegiatan seperti pelatihan robotika, olimpiade sains dan sertifikasi Cambridge pernah diikuti selama SMA. Pada tahun 2012 sebagai gerbang awal, penulis mendapat kesempatan untuk mewujudkan cita-citanya dengan diterimanya sebagai mahasiswa di Departemen Teknik Kelautan FTK ITS dengan NRP 4312100142.

Selama menempuh pendidikan di perguruan tinggi, penulis tak hanya aktif di bidang akademik, penulis juga aktif di berbagai organisasi dan menjalankan start up bisnis. Penulis mendirikan komunitas berbahasa Inggris dengan nama Speak Up English Club pada tahun 2017 bersama teman-temannya sebagai bentuk persiapan persaingan global. BSO ITS Education Care Center BEM ITS merupakan organisasi awal di kampus yang diikuti dari tahun 2013 hingga 2016, di organisasi ini penulis pernah mendapat amanah sebagai *Vice Director* periode 2015-2016. Penulis juga tergabung sebagai Steering Committee kegiatan orientasi mahasiswa departemen teknik kelautan periode 2014-2015. Penulis juga mendapat kesempatan untuk menjadi Wakil Ketua organisasi Keluarga Mahasiswa Situbondo di Surabaya periode 2013-2015. Pada tahun terakhir perkuliahan penulis mengambil Tugas Akhir dengan bidang peminatan pada keilmuan rekayasa pantai. Penulis mengambil topik penelitian mengenai *scouring* (penggerusan) pada pipa sebagai syarat kelulusan sarjana teknik. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi selanjutnya. Untuk menghubungi penulis dapat melalui email : bagusper7@gmail.com.